



Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Výpočtový software ventilace a oteplení synchronních strojů

Autor práce: Jan Kopačka  
Vedoucí práce: Ing. Roman Pechánek, Ph.D.

Plzeň 2016

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan KOPAČKA**  
Osobní číslo: **E13B0043P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Výpočtový software ventilace a oteplení synchronních strojů**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

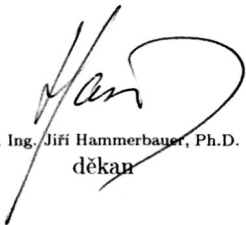
1. Seznamte se s metodami modelování oteplení elektrických strojů.
2. Sestavte dle zadání vedoucího modulární ventilací a tepelnou síť synchronního stroje.
3. Aplikujte výpočet ventilace a oteplení synchronního stroje do grafického rozhraní vytvořeném v softwaru Matlab.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

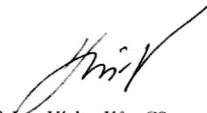
1. **Hak, J. , Ošlejšek, O. : Výpočet chlazení elektrických strojů, VÚES / Brno, 1973.**
2. **Vlach, R. : Tepelné procesy v mechatronických soustavách, VUT, 2007.**
3. **veřejně dostupné informační zdroje, databáze [www.ieee.org](http://www.ieee.org).**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Roman Pechánek, Ph.D.**  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**

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



  
Prof. Ing. Václav Kús, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

# Abstrakt

Tato bakalářská práce se věnuje výpočtu oteplení synchronního stroje s permanentními magnety pomocí metody náhradní tepelné sítě. Hlavní část této práce je vytvoření výpočtového programu ventilace a oteplení stroje s grafickým uživatelským rozhraním v softwarovém prostředí Matlab.

## Klíčová slova

Synchronní stroj , Oteplení, Tepelná síť, Tepelný odpor, Matlab, GUI,

# Abstract

Kopačka, Jan. *Calculation software of ventilation and heating of synchronous machine* [Výpočtový software ventilace a oteplení synchronních strojů]. Pilsen, 2016. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electromechanics and Power Electronics. Supervisor: Roman Pechánek

---

This bachelor work deals with the calculation warming synchronous machine with permanent magnet. For a calculation is used a method of replacement heating network. The main part of this work is developing a program of ventilation and warming the machine with graphical user interface in software Matlab.

## Keywords

Synchronous Machine , Temperature rise, Thermal network, Thermal resistance, Matlab, GUI,

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 1. června 2016

Jan Kopačka

.....

Podpis

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Romanu Pechánkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

Seznam obrázků	vii
Seznam symbolů a zkratek	viii
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Sdílení tepla</b>	<b>2</b>
2.1 Vedení tepla . . . . .	2
2.1.1 Měrná tepelná vodivost . . . . .	3
2.2 Sálání tepla . . . . .	4
2.3 Proudění tepla . . . . .	5
2.3.1 Přirozené proudění . . . . .	5
2.3.2 Nucené proudění . . . . .	6
<b>3 Ztráty v synchronním stroji</b>	<b>7</b>
3.1 Jouleovy ztráty . . . . .	8
3.2 Ztráty v železe . . . . .	8
3.2.0.1 Ztráty v železe zubů a v jhu . . . . .	9
3.3 Ztráty permanentních magnetů . . . . .	9
3.4 Ztráty mechanické . . . . .	9
3.5 Ztráty dodatečné . . . . .	10
3.5.1 Dodatečné ztráty na prázdno . . . . .	10
3.5.2 Dodatečné ztráty při zatížení . . . . .	11
<b>4 Tepelný výpočet pomocí náhradní tepelné sítě</b>	<b>12</b>
4.1 Popis náhradní tepelné sítě . . . . .	12
4.2 Tepelné odpory . . . . .	14
4.2.0.1 Tepelný odpor vedení tepla . . . . .	14
4.2.0.2 Tepelný odpor přestupu tepla . . . . .	14
4.2.1 Součinitel přestupu tepla . . . . .	15
4.3 Řešení náhradní tepelné sítě . . . . .	16
4.3.1 Matice pro ustálený stav . . . . .	16
4.3.2 Matice pro neustálený stav . . . . .	17



<b>5</b>	<b>Ventilační výpočet</b>	<b>18</b>
5.0.3	Charakter proudění . . . . .	19
5.0.4	Nusseltovo číslo . . . . .	20
<b>6</b>	<b>Výpočetní program</b>	<b>21</b>
6.1	Matlab . . . . .	21
6.1.1	Prostředí . . . . .	22
6.1.2	GUI – (Graphical user interface) . . . . .	23
6.2	Popis výpočtového programu . . . . .	25
6.3	Editace . . . . .	27
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>30</b>
	<b>Reference, použitá literatura</b>	<b>31</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>32</b>
<b>A</b>	<b>Výpočet odporů</b>	<b>32</b>
A.1	R(12) Zub - Vinutí . . . . .	32
A.2	R(13) Vinutí - jho . . . . .	33
A.3	R(14) Vinutí - čelo . . . . .	33
A.4	R(17) Vinutí - vzduchová mezera . . . . .	34
A.5	R(23) Zub - jho . . . . .	34
A.6	R(27) Zub - vzduchová mezera . . . . .	34
A.7	R(24) Zub - čelo . . . . .	35
A.8	R(38) jho - okolí . . . . .	35
A.9	R(37) jho - vzduch axiální . . . . .	36
A.10	R(47) čelo - vzduch . . . . .	36
A.11	R(57) magnet - vzduchová mezera . . . . .	36
A.12	R(65) magnet - hřídel . . . . .	37
A.13	R(67) hřídel - vzduch . . . . .	37
A.14	R(78) vzduch - okolí . . . . .	38

# Seznam obrázků

4.1	Tepelná síť synchronního motoru s permanentním magnetem. . . . .	13
5.1	Laminární a turbulentní proudění . . . . .	19
6.1	Prostředí Matlab . . . . .	22
6.2	Editor proměnných . . . . .	23
6.3	GUIDE Quisck start . . . . .	24
6.4	GUI editor . . . . .	25
6.5	Struktura programu . . . . .	25
6.6	Přehled karet . . . . .	26
6.7	Záložka mezi výsledky . . . . .	26
6.8	Záložka výsledky . . . . .	27
6.9	Tab Panel Konstruktor . . . . .	29

# Seznam symbolů a zkratek

## Zkratky

PM .....	Permanentní magnety
GUI .....	Grafické uživatelské rozhraní
MKP .....	Metoda konečných prvků

## Symbole

$c_v$ .....	tepelná kapacita vzduchu vztažená na jednotku objemu $\left[\frac{J}{m^3 \cdot K}\right]$
$D$ .....	průměr rotoru $[m]$
$D_h$ .....	hydraulický průměr kanálu $[m]$
$G$ .....	matice tepelných vodivostí $\left[\frac{W}{K}\right]$
$g$ .....	tepelná vodivost $\left[\frac{W}{K}\right]$
$Nu$ .....	Nusseltovo číslo $[-]$
$n$ .....	otáčky rotoru $\left[\frac{ot}{min}\right]$
$\Delta P$ .....	ztráty stroje $[W]$
$Q$ .....	objemový průtok $\left[\frac{m^3}{s}\right]$
$R$ .....	tepelný odpor $\left[\frac{K}{W}\right]$
$Re$ .....	Reynoldsovo číslo $[-]$
$S$ .....	průřez kanálu, chladič povrch $[m^2]$
$V_m$ .....	celkový objem magnetu $[m^3]$
$v$ .....	střední rychlost proudění tekutiny, obvodová rychlost rotoru $\left[\frac{m}{s}\right]$
$\alpha$ .....	součinitel přestupu tepla $\left[\frac{W}{K \cdot m^2}\right]$
$\varepsilon$ .....	emisivita $[-]$
$\lambda$ .....	měrná tepelná vodivost $\left[\frac{W}{K \cdot m}\right]$
$\nu$ .....	kinematická viskozita $\left[\frac{m^2}{s}\right]$
$\rho$ .....	rezistivita $[\Omega \cdot m]$
$\vartheta$ .....	teplota, oteplení $[^\circ C], [K]$

# 1

## Úvod

Při návrhu elektrické stroje je v současné době jeden z nejdůležitějších faktorů výpočet oteplení, které se týká disciplíny chlazení a ventilace. Výpočet oteplení stroje je nedílnou součástí návrhu elektrického stroje již v první fázi vývoje společně s elektromagnetickým návrhem, jelikož z velké části ovlivňují dimenzování aktivních, tak i konstrukčních materiálů.

Hlavní cíl této bakalářské práce je vytvořit výpočtový software ventilace a oteplení synchronních strojů v softwaru Matlab, program bude vybavený grafickým rozhraním pro snadnější manipulaci.

Výpočet oteplení bude řešen metodou náhradní tepelné sítě, které zobrazuje cestu proudění tepla ve stroji. Hlavní úkol tepelného výpočtu je kontrola oteplení jednotlivých částí stroje, především oteplení vinutí. V našem případě se budeme zabývat synchronními stroji používanými v trakci, u kterých je třeba zohledňovat i oteplení v přechodovém stavu.

## 2

# Sdílení tepla

Odvod ztrátového tepla do chladícího prostředí např. vzduchu, vody probíhá na základě tepelné vodivosti částí stroje a sdílení tepla z chladících povrchů. Sdílení tepla probíhá třemi způsoby:[1]

- vedením tepla
- sáláním tepla
- prouděním (konvekci) tepla
  - přirozené proudění
  - nucené proudění

Každý z těchto způsobů má svůj vlastní fyzikální princip. U elektrických strojů lze říci že využívají všechny tři způsoby odvodu tepla současně, ale vždy jeden způsob převyšuje. Převyšující způsob určují části stroje. U uvnitř stroje se nejvíce projeví sdílení tepla vedením naopak, když budeme uvažovat o sdílení tepla s okolím tak v tomto případě jde o sdílení tepla sáláním a prouděním.[1, 2]

## 2.1 Vedení tepla

Tento druh sdílení tepla využívá teplotní spád (teplotní rozdíl), tedy procházející tepelný tok z místa vyšší teploty do místa s nižší teplotou, například přestup tepla z vinutí přes izolaci do zubů v tomto případě teplotní spád určuje oteplení vinutí. Vedení tepla popisuje Fourierův zákon. Velikost tepelného toku ve směru je přímo úměrná teplotnímu gradientu v témž směru. Tedy vztah popisující tepelný tok: [2, 5]

$$\Delta P = -\lambda \cdot S \cdot \text{grad}\vartheta \quad [W] \quad (2.1)$$

- Kde:

- $\lambda$  měrná tepelná vodivost  $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
- $S$  průřez, kterým tepelný tok prochází  $[m^2]$
- $grad\vartheta$  teplotní gradient  $\left[\frac{K}{m}\right]$

znaménko – v rovnici 2.1 určuje, že při kladném směru tepelného toku je teplotní gradient záporný, tedy v tentýž směru se teplota snižuje.

V případě že uvažujeme pouze jednorozměrný případ proudění tak lze zapsat vztah 2.1 ve zjednodušeném tvaru[6]:

$$\Delta P = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta\vartheta}{l} \quad [W] \quad (2.2)$$

- Kde:

- $l$  tloušťka izolace  $[m]$
- $\Delta\vartheta$  teplotní rozdíl v tělese  $[K]$

### 2.1.1 Měrná tepelná vodivost

Měrná tepelná vodivost  $\lambda$  je klíčová veličina při volbě materiálu, proto je snaha při návrhu elektrického stroje volit konstrukční materiál s co největší tepelnou vodivostí, aby bylo dosaženo co nejmenšího tepelného odporu a tím pádem co nejmenší tepelný spád. Hodnota této veličiny se určuje experimentálně pro každý materiál. U kovů vodivost klesá s rostoucí teplotou a naopak u izolantu měrná tepelná vodivost roste společně s rostoucí teplotou. V tabulce 2.1 nalezneme vodivosti použité v našem případě.[2, 5]

Materiál	$\lambda \left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
vzduch	0,025
měď	385,0
hliník	205,0
ocel	50,20
izolace	0,040

**Tab. 2.1:** Tepelné vodivosti použité v našem případě

## 2.2 Sálání tepla

Sdílení tepla sáláním je v chlazení elektrických strojů takřka bezvýznamný. Bere se v potaz jen u malých uzavřených elektrických motorů a u velkých vytápěných strojů, které se vytápějí aby se zabránilo kondenzaci vodních par.

Princip sdílení tepla je následující. Při sálání vyzařuje povrch tělesa do okolí tepelné paprsky, které vznikají částečnou přeměnou energie tělesa. Tyto tepelné paprsky procházejí prostorem do všech směru přímočaře, aniž by procházející prostor ohřívají. V případě že se v prostoru kde se tyto paprsky vyskytují objeví jiné těleso tak se částečně nebo úplně měnění zpět v teplo. Tepelné paprsky se dají přirovnat k světelným, akorát mají větší vlnovou délku a jsou neviditelné. Intenzita těchto paprsků klesá s druhou mocninou vzdálenosti. Toto sdílení tepla je ovlivněno tvarem, povrchem, vzájemnou polohou a teplotou vyzařujícího a ozařovaného povrchu.[2]

Vyzařující energie sálání je dán Stefan-Boltzmannovým zákonem[5]:

$$\Delta P = 5,78 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon \cdot (T^4 - T_0^4) \cdot S \quad [W] \quad (2.3)$$

- Kde:

- $\varepsilon$  činitel emisivity [–]
- $T$  teplota plochy [K]
- $T_0$  teplota vzdáleného okolí [K]
- $5,78 \times 10^{-8}$  Stefan-Boltzmannova konstanta  $[\frac{W}{m^2 \cdot K^4}]$

Činitel emisivity  $\varepsilon$  je konstanta která udává schopnost vyzařovat teplo. Tato konstanta je závislá na barvě nátěru, drsnosti povrchu, barva s nejlepší sálavostí a absorpcí tepla je černá a hodnota jejího činitele emisivity  $\varepsilon = 1$ , naopak plochy lesklé nebo bílé jsou na tom s absorpcí a sálavostí nejhůře a jejich činitel emisivity je  $\varepsilon = 0,1$ . U elektrických strojů se používají obvykle povrchy s činitelem emisivity  $\varepsilon \cong 0,85 - 0,88$ . [5]

Vztah používán pro výpočet tepelného toku v praktických výpočtech[2]:

$$\Delta P = \alpha_s \cdot S \cdot (\vartheta_0 - \vartheta_R) \quad [W] \quad (2.4)$$

- Kde:

- $\alpha_s$  součinitel přestupu tepla sáláním  $[\frac{W}{cm^2}]$
- $\vartheta_0$  teplota tělesa [K]
- $\vartheta_R$  teplota prostoru [K]
- $S$  vyzařující plocha [ $m^2$ ]

V sdílení tepla spálením je součinitel přestupu tepla závislý na teplotě prostoru  $\vartheta_R$  a na teplotě tělesa  $\vartheta_0$ . Pro výpočty v elektrických strojích lze počítat s přibližnou hodnotou součinitele  $\alpha_s = (5 - 7) \cdot 10^{-4} \left[ \frac{W}{cm^2} \right]$ . [2]

## 2.3 Proudění tepla

Tento způsob sdílení tepla uplatňuje princip styku pevné látky s chladícím médiem kapalného nebo plynného skupenství. Tento druh sdílení tepla se rozlišuje na dva druhy, na přirozené proudění a na nucené proudění, těmto druhům proudění se budeme věnovat podrobněji v dalším odstavci. [2]

Tepelný tok  $\Delta P$  je určen vztahem:

$$\Delta P = \alpha_k \cdot S \cdot (\vartheta - \vartheta_0) \quad [W] \quad (2.5)$$

• Kde:

- $\alpha_k$  součinitel přestupu tepla konvekcí  $\left[ \frac{W}{cm^2} \right]$
- $\vartheta$  teplota chladícího povrchu  $[K]$
- $\vartheta_0$  teplota proudícího chladiva  $[K]$
- $S$  chladící povrch  $[m^2]$

Součinitel přestupu tepla konvekcí  $\alpha_k$  není konstanta, tato veličina je závislá na chladícím povrchu  $S$  a na teplotě chladícího povrchu  $\vartheta$ . Dále je třeba rozlišovat při určování tohoto součinitele pro jaké proudění bude použita. Pozor nezaměňovat se součinitelem přestupu tepla sálání. [2]

### 2.3.1 Přirozené proudění

Tento druh proudění se u elektrických strojů vyskytuje k odvodu tepla u uzavřených malých motorů bez vnější ventilace. Toto proudění funguje na principu vztlaku, který vzniká v blízkosti teplých ploch. Přirozené proudění se podílí na odvodu tepla pouze částečně, jelikož na celkovém odvodu tepla se při přirozeném proudění podílí ve stejném poměru sdílení tepla sáláním. [2]

Pro výpočet součinitele přestupu tepla v závislosti na teplotě lze použít následující vztah dle knihy [2].

$$\alpha_k = \left( \frac{\vartheta - \vartheta_0}{\vartheta_a} \right)^{1/4} \quad \left[ \frac{W}{cm^2} \right] \quad (2.6)$$

• Kde:

- $\vartheta_a$  absolutní teplota  $[K]$



### 2.3.2 Nucené proudění

Při nuceném proudění jsou části stroje z nichž je odváděno teplo chlazen cizí ventilací, nebo nuceným prouděním chladicího média kapaliny nebo plynu. Při tomto odvodu tepla chladicí medium může stroj protékat nebo obtékat. V tomto případě se při výpočtu zaneřádává sdílení tepla sáláním jelikož součinitel přestupu tepla pro nucené proudění na rozdíl od přirozeného proudění je podstatně větší a je pouze nepatrně závislí na teplotě.[2]

Pro výpočet součinitele přestupu tepla je třeba v tomto případě znát rychlost proudění chladicího média. Vztahy pro výpočet  $\alpha_k$  byli určeny experimentálně a jsou poměrně jednoduché a spolehlivé.[2]

$$\alpha_k = 10^{-4} \cdot (30 \cdot \sqrt{v} - 20) \quad \left[ \frac{W}{cm^2} \right] \quad (2.7)$$

- Kde:

–  $v$  rychlost proudění chladicího média  $\left[ \frac{m}{s} \right]$

Tento vztah je platný pouze pro proudění chladicího media při rychlosti od 5 do 45  $\left[ \frac{m}{s} \right]$ . [2]

# 3

## Ztráty v synchronním stroji

Celkové ztráty vznikající v synchronním stroji s permanentními magnety  $\Delta P$  se skládají z dílčích ztrát:

- Jouleovy ztráty ve vinutí statoru  $\Delta P_j$
- Ztráty v železe (ve jhu a zubech) statoru  $\Delta P_{Fe}$
- Ztráty permanentních magnetů  $\Delta P_{PM}$
- Ztráty mechanické  $\Delta P_{mech}$ 
  - ventilační ztráty
  - tření v ložiskách
  - tření rotoru a chladicího média
- Dodatečné ztráty  $\Delta P_d$ 
  - vířivými proudy ve vinutí statoru a rotoru, a v dalších částech stroje
  - na povrchu statoru a rotoru
  - pulzační v zubech statoru

**Celkové ztráty:**

$$\Delta P = \Delta P_j + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{PM} + \Delta P_d \quad \left[ \frac{K}{W} \right] \quad (3.1)$$

Statorové ztráty synchronních strojů se střídavým vinutím umístěným v drážkách se neliší od ztrát na statoru asynchronních strojů, jelikož se od sebe konstrukčně neliší. Tedy výpočet těchto ztrát je stejný jako u asynchronních strojů.[8]

## 3.1 Jouleovy ztráty

Jouleovy ztráty jsou ztráty elektrická ve vinutí. Tyto ztráty se určují při chodu na prázdko ze vztahu:

$$\Delta P_j = R \cdot I^2 \cdot m \quad [kW] \quad (3.2)$$

- Kde:
  - $I$  proude statorem na prázdko [A]
  - $R$  odpor vinutí statoru [ $\Omega$ ]
  - $m$  počet fází [-]

Odpor  $R$  se vypočte ze vztahu:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S \cdot a} \cdot k \quad [\Omega] \quad (3.3)$$

- Kde:
  - $\rho$  rezistivita materiálu vinutí při uvažované teplotě [ $\Omega m$ ]
  - $a$  počet paralelních větví
  - $k$  činitel zvětšení odporu působením povrchového jevu
  - $S$  průřez vodiče cívky statorového vinutí [ $m^2$ ]
  - $L$  celková délka efektivních vodičů jedné fáze vinutí [m]

## 3.2 Ztráty v železe

Ztráty v železe se dělí na ztráty **hysterezi**  $\Delta P_h$  a na ztráty **vířivými proudy**  $\Delta P_w$ . Tyto ztráty jsou závislé na vlastnostech použité elektrotechnické oceli. [1, 8]

Přesný výpočet těchto ztrát je možná pouze metodou MKP. Proto se pro výpočet ztrát v železe u strojů používá analytické řešení dle vztahu (3.4), který vyplývá z výsledků dlouholetých zkušeností.[1]

$$\Delta P_{Fe} = k_p \cdot \Delta p_{1,0} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \cdot B_i^2 \cdot m_i \quad [W] \quad (3.4)$$

- Kde:
  - $k_p$  činitel respektující zvětšení ztrát v důsledku ražení, nerovnoměrnosti indukce apod .
  - $\Delta p_{1,0}$  měrné ztráty v 1kg železa při indukci  $B = 1[T]$  a frekvenci  $F = 50[Hz]$
  - $f$  frekvence přemagnetování [Hz]
  - $B_i$  indukce v dané části stroje [T]
  - $m_i$  hmotnost odpovídající části stroje [kg]
  - $\beta$  exponent závislejší na druhu použité ocele.

### 3.2.0.1 Ztráty v železe zubů a v jhu

Ztráty v železe zubů statoru  $\Delta P_{F_{ez}}$  a ztráty v jhu statoru  $\Delta P_{F_{ej}}$  vypočteme dosazením do rovnice (3.4), za hmotnost  $m_i$  dosadíme hmotnost  $m_j$  pro jho a  $m_z$  pro zuby statoru. Dále dosadíme za indukci  $B_i$  indukce  $B_j$  ve středním průřezu jha a  $B_z$  ve středním průřezu zubu. Výpočet těchto veličin se nachází v publikaci [1]. Činitele  $k_p$  pro výpočet ztrát ve jhu je  $k_p \approx 1,5 - 2$ , pro ztráty v zubech je činitel  $k_p \approx 1,2 - 1,4$ . [1, 8]

## 3.3 Ztráty permanentních magnetů

Ztráty vznikající v permanentních magnetech jsou významné ve srovnání s celkovými ztrátami stroje, proto je jejich výpočet důležitý, jelikož zajištění provozní teploty rotoru je oproti statoru náročné. [3]

Při výpočtu ztrát permanentních magnetů (PM) uvažujeme jen ztráty vířivými proudy, hysterézní ztráty se ignorují. Tedy ztráty vířivými proudy odpovídají ztrátám Jouleovo a počítají se na jednotku objemu PM. [4]

Tedy vířivé ztráty PM vypočten přibližně z rovnice [9]:

$$\Delta P_{PM} \approx \frac{V_m \cdot b_m^2 \cdot \phi_m^2 \cdot \omega^2}{12 \cdot \rho_m} \quad [W] \quad (3.5)$$

• Kde:

- $V_m$  celkový objem magnetu [ $m^3$ ]
- $b_m$  šířka magnetu [m]
- $\phi_m$  magnetického toku ve vzduchové mezeře [Wb]
- $\omega_m$  frekvence [ $\frac{rad}{s}$ ]

Kompletní odvození rovnice (3.5) naleznete v publikaci [9].

## 3.4 Ztráty mechanické

Mechanické ztráty se skládají ze ztrát způsobených třením otáčejících se částí stroje o vzduch, ventilačních ztrát<sup>1</sup> a ze ztrát způsobených třením ložisek. [1]

Výpočet mechanických ztrát může být proveden pouze přibližně. Přesnou hodnotu těchto ztrát lze získat pouze měřením na vyrobeném stroji. Pro výpočet používáme empirické vzorce<sup>2</sup>. Tyto vzorce se liší podle typu strojů. [1, 8]

Empirický vztah pro výpočet mechanických ztrát na synchronním stroji je:

$$\Delta P_{mech} \approx 3,68 \cdot p \left( \frac{v}{40} \right)^3 \cdot \sqrt{l_1} \quad [W] \quad (3.6)$$

<sup>1</sup>Pouze u strojů chlazených vzduchem

<sup>2</sup>Vzorce vytvořené na základě zkušeností, experimentů

- Kde:
  - $p$  pólové dvojce
  - $v$  obvodová rychlost rotoru  $\left[\frac{m}{s}\right]$
  - $l_1$  celková délka statoru [m]

Výpočet  $v$  obvodové rychlosti rotoru je ze vztahu:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \quad \left[\frac{m}{s}\right] \quad (3.7)$$

- Kde:
  - $D$  průměr rotoru [m]
  - $n$  otáčky rotoru  $\left[\frac{ot}{min}\right]$

## 3.5 Ztráty dodatečné

Přídavné ztráty (dodatečné) se dělí do dvou kategorií, na ztráty které se projevují při chodu na prázdno a nejsou závislé na zatížení stroje a na ztráty závislé na zatěžovacím proudu. Podle toho se tyto ztráty nazývají:[1]

- Dodatečné ztráty na prázdno
- Dodatečné ztráty při zatížení

### 3.5.1 Dodatečné ztráty na prázdno

Dodatečné ztráty na prázdno jsou v podstatě ztráty v železe a počítají se pro stator tak i pro rotor, dělí se na povrchové ztráty a na pulsní ztráty.

**Povrchové ztráty** vznikají v důsledku pulsací indukce ve vzduchové mezeře. Která vzniká při práci stroje, jelikož se indukce ve vzduchové mezeře mění od největší hodnoty do nejmenní hodnoty. Tato změna indukce vzniká z důvodu změny magnetické vodivosti vzduchové mezery v důsledku otevření drážek. Tento jev zapříčiní vznik vířivých proudů na povrchu hlav zubů, které vyvolají povrchové ztráty, které jsou závislé na počtu drážek a na frekvenci otáčení. Povrchové ztráty na statoru jsou vyvolávány drážkováním rotoru a povrchové ztráty rotoru jsou vyvolávány drážkováním statoru. [1]

### 3.5.2 Dodatečné ztráty při zatížení

Dodatečné ztráty při zatížení vznikají ve vodiči vinutí tak i v různých částech magnetického obvodu. Zatěžovací proud vyvolává rozptylové toky spřažené s vodiči vinutí. A na základě toho se ve vodičích indukují vířivé proudy, které vyvolávají dodatečné ztráty při zatížení takové, které nejsou zohledněny v předchozích výpočtech ztrát.[1]

Tyto ztráty se počítají obvykle jen u strojů s velkými výkony. U strojů menších výkonu se tyto ztráty určují pouze přibližně. Dle normy ČSN se uvažují tyto ztráty přibližně 0,5% jmenovitého výkonu.[1]

V našem případě budeme počítat dodatečné ztráty procentně z celkových.

# 4

## Tepelný výpočet pomocí náhradní tepelné sítě

Metoda náhradní tepelné sítě využívá tepelné odpory, její řešení je analogické s řešením elektrických obvodů. Tato metoda se uplatňuje nejen při řešení dvourozměrných úloh, ale používá se i při řešení trojrozměrných úloh, kdy se sčítají tepelné odpory ve třech směrech tepelných toků.[1]

Náhradní tepelná síť umožňuje přibližně určovat střední hodnoty teplot částí elektrických strojů, které se berou jako trojrozměrná tělesa.[7]

Pro každou část tepelné sítě (tepelného schématu) platí základní vztah.

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = P_{12}R_{12} \quad (4.1)$$

• Kde:

- $\vartheta_1, \vartheta_2$  střední teploty jednotlivých částí stroje [K]
- $P_{12}$  tepelný tok mezi jednotlivými částmi stroje [W]
- $R_{12}$  tepelný odpor mezi jednotlivými částmi stroje [ $\frac{K}{W}$ ]

Přesnost výpočtu pomocí náhradní tepelné sítě závisí na počtu prvků (charakterizujících jednotlivé části stroje) ve schématu. Čím větší je počet prvků tím je výpočet přesnější, ale náhradní síť bude o to složitelnější a tím i výpočet.[1]

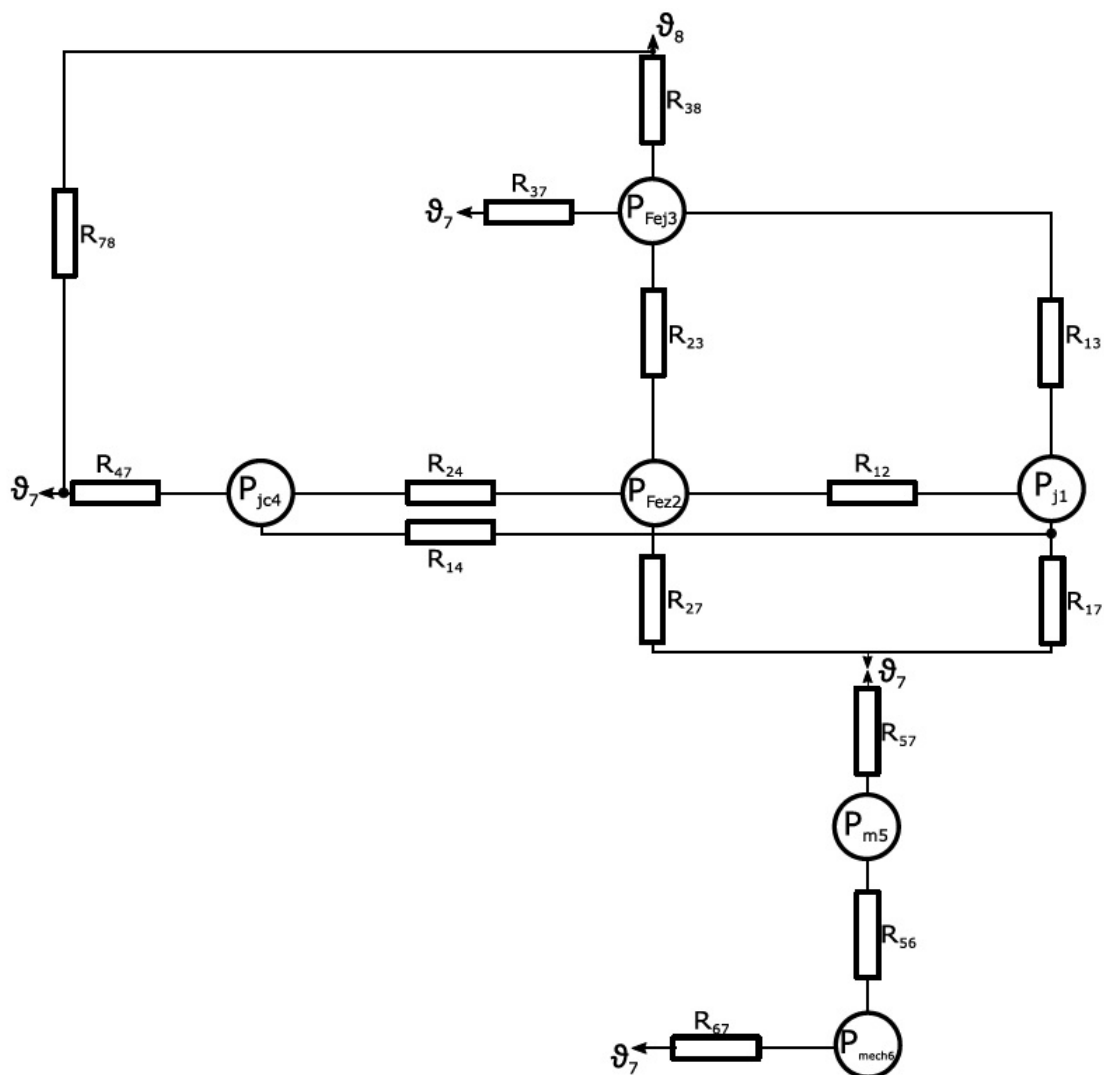
### 4.1 Popis náhradní tepelné sítě

Na příkladu synchronního stroje s permanentním magnetem si popíšeme náhradní tepelnou síť obr.

Tepelná síť na **obr.(4.1)** se skládá z **6** zdrojů tepla (uzlů)  $\Delta P$ , které jsou spojeny přes **14** tepelných odporů  $R$  a dále obsahuje **2** nory<sup>1</sup>  $\vartheta$

---

<sup>1</sup>místa odvodu tepla



**Obr. 4.1:** Tepelná síť synchronního motoru s permanentním magnetem.

- Jednotlivé uzly představují následující ztráty:
  - $\Delta P_{j1}$  ztráty ve vinutí statoru.
  - $\Delta P_{Fez2}$  ztráty v zubu statoru.
  - $\Delta P_{Fej3}$  ztráty v jho statoru.
  - $\Delta P_{jc4}$  ztráty v čele vinutí statoru.
  - $\Delta P_{m5}$  ztráty v permanentním magnetu rotoru.
  - $\Delta P_{mech6}$  ztráty na hřídeli rotoru.

V našem případě je tepelná síť poměrně zjednodušená jelikož náš stroj je axiálně symetrický, proto jsme si mohli dovolit navrhnout síť jen pro jednu polovinu stroje.



## 4.2 Tepelné odpory

Při výpočtu tepelného odporu rozlišujeme tepelné odpory na dva základní druhy:

- tepelný odpor vedení tepla
- tepelný odpor přestupu tepla

v následujících podkapitolách se budeme věnovat výpočtům jednotlivých druhů tepelných odporů.

### 4.2.0.1 Tepelný odpor vedení tepla

Výpočet tepelného odporu vedením vyplývá z rovnice 2.2 pro tepelný spád při sdílení tepla vedením. Tuto rovnici lze zapsat v následujícím tvaru:

$$\Delta\vartheta = \frac{\Delta P \cdot l}{\lambda \cdot S} = \Delta P \cdot R_t \quad [K] \quad (4.2)$$

potom po jednoduché upravě dostaneme výsledný vzorec pro výpočet tepelného odporu vedením.[10]

$$R_t = \frac{l}{S \cdot \lambda} \quad \left[ \frac{K}{W} \right] \quad (4.3)$$

- Kde:

- $\lambda$  měrná tepelná vodivost  $\left[ \frac{W}{K \cdot m} \right]$
- $l$  tloušťka izolace [m]
- $S$  průřez, kterým tepelný tok prochází [ $m^2$ ]

Ve většině případech se tento odpor sčítá sériově s ostatními odpory materiálů které jsou řazeny v sérii. Například odpor vlnutí, izolace a drážky.[10]

$$R_t = R_{t1} + R_{t2} + \dots + R_{tn} \quad \left[ \frac{K}{W} \right] \quad (4.4)$$

### 4.2.0.2 Tepelný odpor přestupu tepla

Při výpočtu tepelného odporu přestupu tepla, je třeba si uvědomit že tento odpor vychází z rovnice 2.5 pro tepelný tok při sdílení tepla prouděním. Tuto rovnici lze upravit do následujícího tvaru:

$$\Delta\vartheta = \frac{\Delta P}{\alpha \cdot S} \quad [K] \quad (4.5)$$

Tento vztah také lze zapsat jako v předešlém případě tepelného odporu vedením a dostaneme:

$$\Delta\vartheta = \Delta P \cdot R_t \quad [K] \quad (4.6)$$

a po následující úpravě dostaneme vztah pro výpočet tepelného odporu přestupu tepla.[10]

$$R_t = \frac{1}{S \cdot \alpha} \quad \left[ \frac{K}{W} \right] \quad (4.7)$$

- Kde:
  - $\alpha$  součinitel přestupu tepla  $\left[ \frac{W}{K \cdot m^2} \right]$

### 4.2.1 Součinitel přestupu tepla

Výpočet tohoto součinitele je velice obtížný, jelikož je závislý na několika veličinách jako je například tvar, rozměry, materiál, povrch tělesa, způsob a rychlost proudění chladícího média, tepelná vodivost, atd. Výpočtové vztahy se určují na základu podobnosti pomocí bezrozměrných veličin. Nejvíce používané bezrozměrné veličiny jsou Nusseltovo a Reynoldsovo číslo. Nusseltovo číslo se značí zkratkou  $Nu$  a Reynoldsovo číslo má zkratku  $Re$ . Výpočet těchto veličin bude popsán v 5. kapitole.[10]

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_h} \quad \left[ \frac{W}{K \cdot m^2} \right] \quad (4.8)$$

- Kde:
  - $\lambda$  měrná tepelná vodivost chladiva  $\left[ \frac{W}{K \cdot m} \right]$
  - $D_h$  hydraulický průměr  $[m]$

Hydraulický průměr se používá v případě že se počítáme s nekruhovým profilem materiálu, v elektrických strojích například při výpočtu součinitele přestupu u chladících kanálů.[6]

Vztah pro výpočet:

$$D_h = \frac{4 \cdot S}{O} \quad [m] \quad (4.9)$$

- Kde:
  - $S$  průřez materiálu  $[m^2]$
  - $O$  obvod materiálu  $[m]$

## 4.3 Řešení náhradní tepelné sítě

Tepelnou síť budeme řešit pro teploty v ustáleném stavu tak i pro teploty v přechodném stavu, tedy budem brát v úvahu i tepelnými kapacity. Metoda pro výpočet byla zvolena uzlová, tato metoda je obdoba metody uzlových napětí v elektrotechnice. Při výpočtu dostaneme soustavu o  $n$  lineárních algebraických rovnic, kterou přepíšeme do maticového zápisu, který má obecný tvar.[10]

$$G \times \bar{\vartheta} = \bar{P} \quad (4.10)$$

• Kde:

- $G$  matice koeficientu soustavy (složená z tepelných vodivostí)  $[\frac{K}{W}]$
- $\bar{\vartheta}$  vektor (sloupcová matice) neznámých oteplení  $[K]$
- $\bar{P}$  vektor (sloupcová matice) zahrnující ztráty resp. zdroje tepla  $[W]$

### 4.3.1 Matice pro ustálený stav

Podrobnější maticový zápis soustavy rovnic pro tepelnou síť v ustáleném stavu má následující tvar.

$$\begin{pmatrix} G_1 & -g_{12} & -g_{13} & \dots & -g_{1n} \\ -g_{21} & G_2 & -g_{23} & \dots & -g_{2n} \\ -g_{31} & -g_{32} & G_3 & \dots & -g_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -g_{n1} & -g_{n2} & -g_{n3} & \dots & G_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \vartheta_3 \\ \vdots \\ \vartheta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta P_{01} + g_{p1} \cdot \vartheta_{01} \\ \Delta P_{02} + g_{p2} \cdot \vartheta_{02} \\ \Delta P_{03} + g_{p3} \cdot \vartheta_{03} \\ \vdots \\ \Delta P_{0n} + g_{pn} \cdot \vartheta_{0n} \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

• Kde:

- $\Delta P_{01}$  zdroj tepla  $[W]$
- $g_{p1}$  tepelná vodivost do toku chladiva  $[\frac{K}{W}]$
- $\vartheta_{p1}$  teplota okolí  $[K]$
- $g_{ij}$  tepelná vodivost  $[\frac{K}{W}]$

$$g_{ij} = \frac{1}{R_{ij}} \quad (4.12)$$

- $G_i$  diagonální prvky matice  $[\frac{K}{W}]$

$$G_i = \sum_{j=1}^n g_{ij} \quad (4.13)$$

Diagonální prvky matice  $G_i$  získáme součtem všech vodivostí vycházejících z daného uzlu. Tedy příklad výpočtu diagonálního prvku  $G_1$  pro tepelnou síť z **obr. (4.1)**. [7]

$$G_1 = \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{13}} + \frac{1}{R_{14}} + \frac{1}{R_{17}} \quad (4.14)$$

### 4.3.2 Matice pro neustálený stav

V tomto případě matici musíme doplnit o tepelné kapacity a to má za následek vznik soustav diferenciálních rovnic pro každý uzel.[6]

$$\begin{pmatrix} C_1 \frac{d\vartheta_1}{dt} \\ C_2 \frac{d\vartheta_2}{dt} \\ C_3 \frac{d\vartheta_3}{dt} \\ \vdots \\ C_n \frac{d\vartheta_n}{dt} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} G_1 & -g_{12} & -g_{13} & \dots & -g_{1n} \\ -g_{21} & G_2 & -g_{23} & \dots & -g_{2n} \\ -g_{31} & -g_{32} & G_3 & \dots & -g_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -g_{n1} & -g_{n2} & -g_{n3} & \dots & G_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \vartheta_3 \\ \vdots \\ \vartheta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta P_{01} + g_{p1} \cdot \vartheta_{01} \\ \Delta P_{02} + g_{p2} \cdot \vartheta_{02} \\ \Delta P_{03} + g_{p3} \cdot \vartheta_{03} \\ \vdots \\ \Delta P_{0n} + g_{pn} \cdot \vartheta_{0n} \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

- Kde:

–  $C_n$  tepelná kapacita  $\left[\frac{J}{K}\right]$

Tato matice se dá řešit analyticky nebo numericky. V našem případě byla tato matice řešena numericky ve výpočtovém programu Matlab, pro vyřešení diferenciální rovnice jsme použili funkci ode45 která využívá metodu numerického řešení Runge-Kutta.

# 5

## Ventilační výpočet

Při ventilačním výpočtu stroje je nezbytné znát tlak potřebný pro protlačení chladicího média (vzduchu) a množství, které má každou sekundu projít strojem (objemové množství).

Množství chladicího média nesmí být příliš malé, protože by mohl dojít k přehřívání stroje, ale zároveň toto množství nesmí být příliš velké, jelikož by docházelo k nárůstu ventilačních ztrát a tím pádem by klesala účinnost stroje.

Proud chladicího média většinou odvádí veškeré ztrátové teplo vzniklé ve stroji, ale teplo vznikající mechanickým namáháním ložiska se odvádí konvekci, nebo olejem (v případě použití tlakového mazání). [1]

Pro výpočet objemového průtoku chladicího média platí vztah

$$Q_v = \frac{\sum \Delta P_v}{c_v \cdot \Delta \vartheta_v} \quad \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (5.1)$$

• Kde:

- $\Delta \vartheta_v$  oteplení vzduchu [ $^{\circ}C$ ]
- $\sum \Delta P_v$  ztráty odváděné vzduchem [W]
- $c_v$  měrná tepelná kapacita vzduchu,  $c_v=1100$   $\left[ \frac{J \cdot m^{-3}}{K} \right]$

Oteplení vzduchu  $\Delta \vartheta_v$  vyplývá z následujícího vztahu.

$$\Delta \vartheta_v = \vartheta_t - \vartheta_0 \quad [^{\circ}C] \quad (5.2)$$

• Kde:

- $\vartheta_t$  teplota vzduchu při výstupu ze stroje [ $^{\circ}C$ ]
- $\vartheta_0$  teplota vzduchu při vstupu do stroje [ $^{\circ}C$ ]

### 5.0.3 Charakter proudění

Vlivem viskozity chladicího média dochází při proudění chladicího média strojem k tření, které způsobuje vznik ztrát v chladicím médiu, tyto ztráty způsobují nerovnoměrné rozložení rychlosti proudění. Rozložení rychlost proudění se mění od maximální hodnoty ve středu stroje po nulovou hodnotu na stěnách. [10]

Charakter proudění se rozlišuje podle rozložení rychlosti proudění na [10] :

- laminární proudění
- turbulentní proudění

hodnotu přechodu mezi jednotlivými druhy proudění udává **Reynoldsovo číslo** a nastává v pásmu  $Re = 1800 - 4000$ . Vztah udávající výpočet tohoto čísla [10]:

$$Re = D \cdot \frac{v}{\nu} \quad [-] \quad (5.3)$$

- Kde:

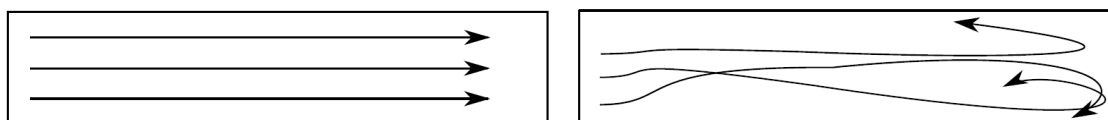
- $D$  charakteristický rozměr kanálu [m]
- $v$  rychlost proudění chladiva  $\left[\frac{m}{s}\right]$
- $\nu$  kinetická viskozita, její hodnota  $2,26 \cdot 10^{-5} \left[\frac{m^2}{s}\right]$  [2]

#### Laminární proudění

se vyskytuje při menších rychlostech proudění, chladicí médium klouzá klidně ve směru proudění, v tomto případě je vnitřní tření udáváno pouze viskozitou chladicího média a tlakové ztráty stoupají úměrně s rychlostí. Tento druh proudění se v elektronických strojích při běžném provozu příliš nevyskytuje. [10]

#### Turbulentní proudění

v tomto případě se chladicí médium neklouže pouze klidně ve směru proudění, ale vznikají víry které vybočují ze směru proudění, rozdělují se a nemají stálou podobu a velikost. Tedy v chladicím médiu je navíc kromě hlavního pohybu i druhotný pohyb (víry), který způsobuje zvětšení tření, ale není závislí na viskozitě. [10]



(a) Laminární proudění

(b) Turbulentní proudění

**Obr. 5.1:** Laminární a turbulentní proudění

### 5.0.4 Nusseltovo číslo

Vyjadřuje vliv proudění na tepelný tok stěnou, a závisí na geometrickém rozložení stroje. Vztahy popisující výpočet Nusseltovo čísla  $Nu$  jsou empirické, a liší se na základě použité literatury. Tyto vztahy byly určeny dle zkušeností z praktických a laboratorních měření a jsou odlišné na základě řešené úlohy.[10]

Následující vztahy jsou pro výpočet  $Nu$  pro jednotlivé části elektrického stroje, které byly použity v našem případě pro výpočet součinitelů přestupů tepla dle rov. 4.8.

**Čelo vinutí statoru [10]:**

$$Re = S \cdot \frac{v}{\nu} \quad [-] \quad (5.4)$$

$$Nu = 3 \cdot Re^{0,3} \quad [-] \quad (5.5)$$

- Kde:

–  $S$  celková plocha čela vinutí [ $m^2$ ]

**Vnější povrch rotoru [10]:**

$$Re = D_r \cdot \frac{v}{\nu} \quad [-] \quad (5.6)$$

$$Nu = 0,38 \cdot Re^{0,65} \quad [-] \quad (5.7)$$

- Kde:

–  $D_r$  vnější průměr rotoru [ $m$ ]

**Vnější povrch statorového svazku [10]:**

$$Re = D_s \cdot \frac{v}{\nu} \quad [-] \quad (5.8)$$

$$Nu = 0,026 \times Re^{0,8} \quad [-] \quad (5.9)$$

- Kde:

–  $D_s$  vnější průměr statoru [ $m$ ]

**Vzduchová mezera [10]:**

$$Re = \pi \times D \cdot c \cdot n \cdot \frac{v}{\nu} \quad [-] \quad (5.10)$$

$$Nu = 0,28 \times Re^{0,65} \quad [-] \quad (5.11)$$

- Kde:

–  $D$  vnější průměr rotoru [ $m$ ]

–  $c$  tloušťka vzduchové mezery [ $m$ ]

–  $n$  otáčky [ $\frac{n}{m}$ ]

# 6

## Výpočetní program

Na začátku této kapitoly je třeba zdůraznit, že tento výpočtový program na výpočet ventilace a oteplení synchronních strojů je určen pro synchronní motor s permanentními magnety označení:  $PMSM - P = 35[kW], n = 9000[ot/s], U = 248[V]$ , ale je možné ho aplikovat i na jiné synchronní stroje s permanentními magnety menších výkonů, za podmínky že stroj je axiálně symetrický a jeho chlazení odpovídá provedení chlazení IC<sup>1</sup>-408, nebo IC-410.

Program byl vytvořen v programovacím jazyku Matlab od firmy MathWorks a byl vybaven grafickým rozhraním pro jednoduší zadávání jednotlivých veličin. Matlab byl zvolen hned z několika důvodů za prvé, jelikož obsahuje rozšíření Simulink, který je velice užitečný v elektrotechnických výpočtech. Také lze do Simulinku jednoduše aplikovat náš výpočtový program a poté lze jednoduše simulovat různé podmínky provozu. Další výhodou Matlab je jednoduchá editace výpočtového programu a grafického rozhraní.

Tento program vypočte oteplení jednotlivých částí stroje a teplotu uvnitř stroje. Ventilací část programu je zahrnuta formou výpočtů součinitelů přestupu tepla. Dále se program skládá z tepelných výpočtů v ustáleném stavu a v přechodném stavu, tyto výpočty jsou provedeny metodou náhradní tepelné sítě, která byla navržena viz kapitola 4.3, proto se dá tento program bez úprav dále aplikovat pouze na axiálně symetrické synchronní stroje. V následující podkapitole bude popsáno jak lze program editovat.

### 6.1 Matlab

Matlab je programovací a skriptovací jazyk a programovací prostředí. Je vhodný pro vědecké a inženýrské výpočty, modelování, simulace, analýzu, vizualizaci dat a tvorbu uživatelského rozhraní. Nejrozšířenější uplatnitelní Matlabu je v technických a ekonomických oborech. V dnešní době rozšiřují možnosti Matlabu toolboxe. Toolboxe jsou soubory M-file zaměřené na specifické operace (statistika, optimalizace, symbolické výpočty, neuronové sítě, zdravotnictví, zpracování signálů a obrazu, atd.).[11]

---

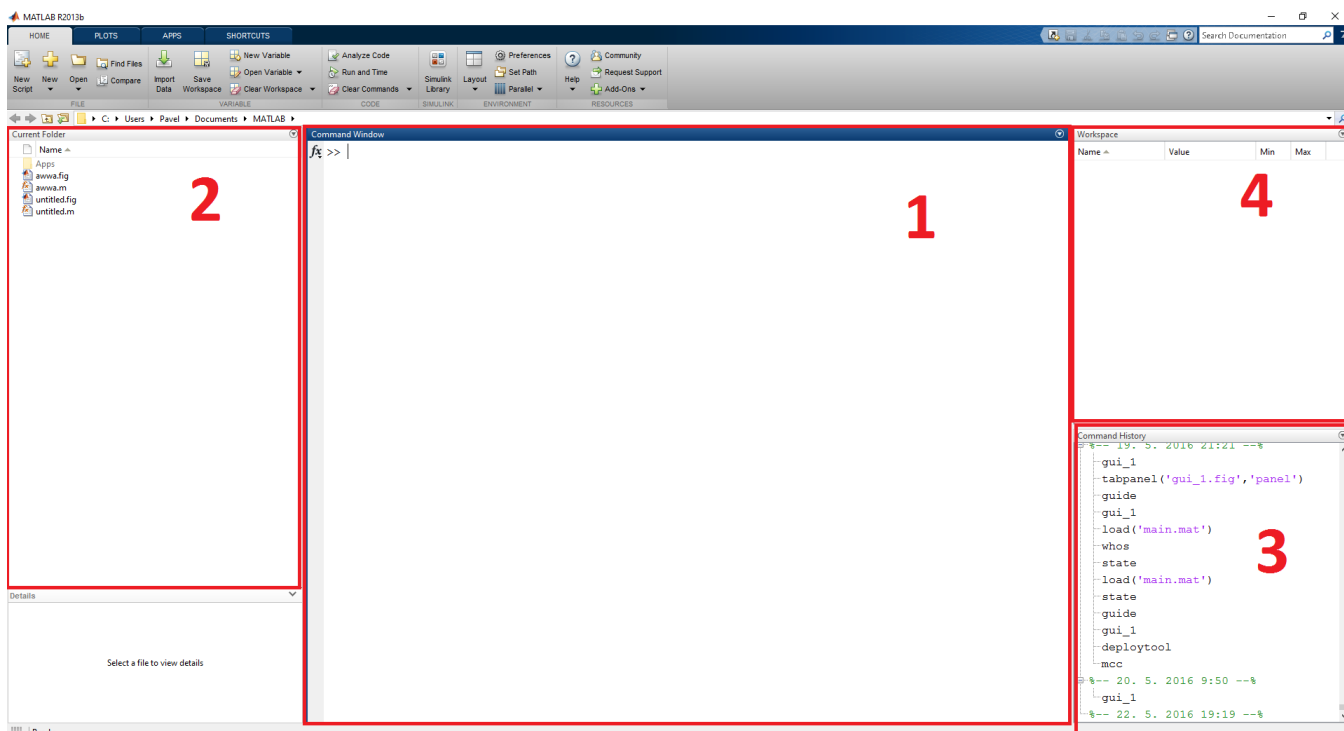
<sup>1</sup>International Cooling



## 6.1.1 Prostředí

Programovací prostředí Matlabu je plně interaktivní. Základem grafického rozhraní jsou následující okna (obr.6.1) :

1. Command window (Příkazové okno)
2. Current folder (Okno pro správu aktuální složky)
3. Workspace (Pracovní prostor)
4. Command history (Okno historie příkazů)



Obr. 6.1: Prostředí Matlab

uspořádání oken není fixní, lze je uspořádat podle vlastního uvážení.

### Coammand window

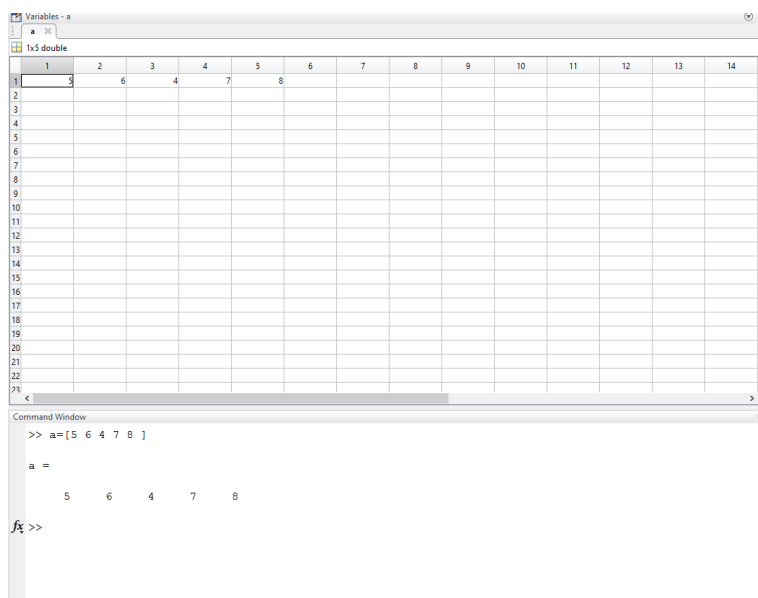
Funkce tohoto okna se dá přirovnat k příkazovému řádku. Slouží ke spuštění jednotlivých funkcí, příkazů atd. a zobrazuje jejich výstupy. Dále se dá použít také jako "kalkulačka".

### Curretn folder

Toto okno zobrazuje aktuální pracovní adresář, umožňuje změnu pracovního adresáře. Taká funguje jako standardní správce souborů, tedy lze provést tyto operace: přejmenování, kopie, přesun a smazání souboru.

## Workspace

obsahuje informace o všech definovaných proměnných (rozměr, typ, velikost v paměti), poklikáním na jejich název lze zobrazit jejich obsah v editoru, který se dá přirovnat Excelu (obr.6.2).



Obr. 6.2: Editor proměnných

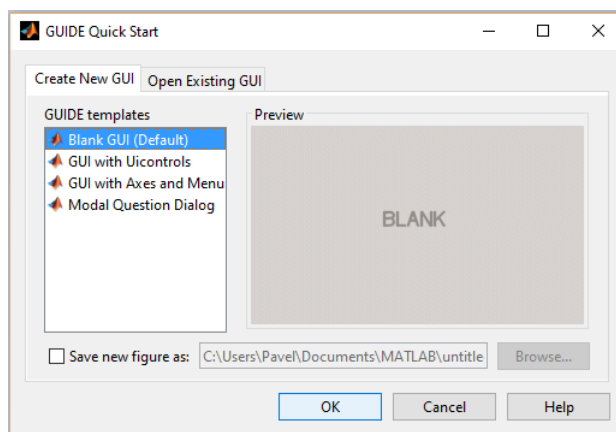
## Command history

Obsahuje všechny použité příkazy, také zaznamenává každé spuštění Matlabu, které je poté označeno datem a časem. Umožňuje opětovné spuštění dříve zadaných příkazů dvojklikem na vybraný příkaz.

### 6.1.2 GUI – (Graphical user interface)

Této podkapitole bude věnována větší pozornost, z důvodu budoucí editace výpočtového programu i pro jiné uživatele.

Grafický user interface v překladu grafické uživatelské rozhraní, lze v programu matlab vytvořit za pomoci editoru do kterého se dostaneme za použití příkazu `guide` který otevře okno **GUIDE Quick start** (obr.6.3) a v tomto okně vyberem možnosti **Blank GUI**, následně se otevře grafický editor pro editaci GUI (obr.6.4). V tomto editoru lze vytvořit kompletně celé GUI, obsahuje seznam všech ovládacích prvků (tlačítka, seznamy, editace, .atd.), dále budeme tyto prvky nazývat objekty. Každý objekt má své specifické označení takzvaný **Tag**. Tato proměna je velice důležitá jelikož označuje jednotlivé objekty a je nezbytné pro další práci s GUI. Při ukládání GUI se automaticky vygeneruje 2 soubory. První soubor má příponu `.fig` a druhý `.m`. Dále budeme věnovat větší pozornost souboru s příponou `.m`, jelikož je to zdrojový kód celého navrženého GUI.



Obr. 6.3: GUIDE Quisck start

Do souboru s příponou `.m` se automaticky vygeneruje několik funkcí, nejdůležitější funkce jsou funkce s příponou `_OpeningFcn` a `_Tag_Callback`. Funkce s příponou `_OpeningFcn` vykonává při spuštění GUI nastavení výchozích hodnot a funkce s příponou `_Tag_Callback` je automaticky vygenerovaná pro každý aktivní objekt (tlačítka, atd.) a aktivuje se při použití objektu.

### Načtení proměnných a výpis

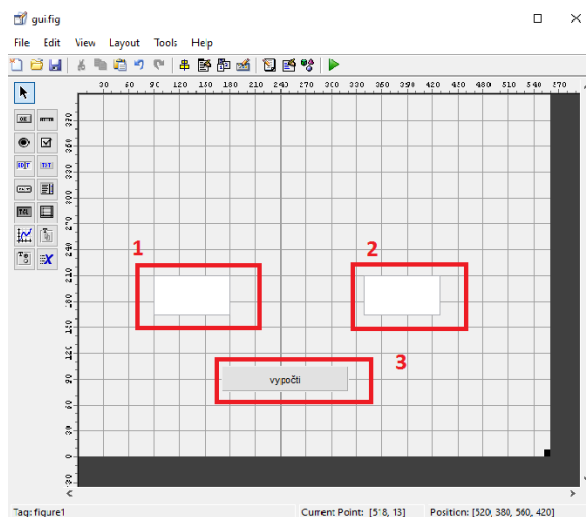
Pro načtení zadaných hodnot do GUI se používá příkaz `get` a pro nastavení hodnoty se používá příkaz `set`. Dále je ukázka krátkého kódu.

```
function vypocti_Callback(hObject, eventdata, handles)
    A = str2num(get(handles.vstup, 'string'));
    pocitej
    set(handles.vysledek, 'string', (num2str(B)));
```

Výše uvedený kód načte do proměnné `A` z okénka 1 (obr.6.4) poté spustí výpočtový skript pojmenovaný `pocitej`, výsledek výpočtu se uloží do proměnné `B`, dále načte do okénka 2 výsledek z proměnné `B`. Cílem tohoto procesu se provede po zmačknutí tlačítka **vypočti**. Použití příkazu `str2num()` je nezbytné, jelikož při zadávání do GUI si funkce `get` bere proměnou jako textový řetězec, tedy nelze snímá poté počítat. Opačný proces `num2str()` se musí provést i u funkce `set`, aby došlo k správnému zobrazení výsledku.

### Více kartové GUI

V našem případě bylo zapotřebí více kartové GUI. Tento problém byl řešen volně dostupným programem *TabPanelKonstruktor* [12]. Tento program mám vyzkoušen na verzi Matlabu R2013b, nelze zaručit podporu nižší verze Matlabu, jelikož více kartové GUI není oficiálně podporováno. Program se spustí příkazem `tabpanel('název_gui.fig', 'aTab')`.



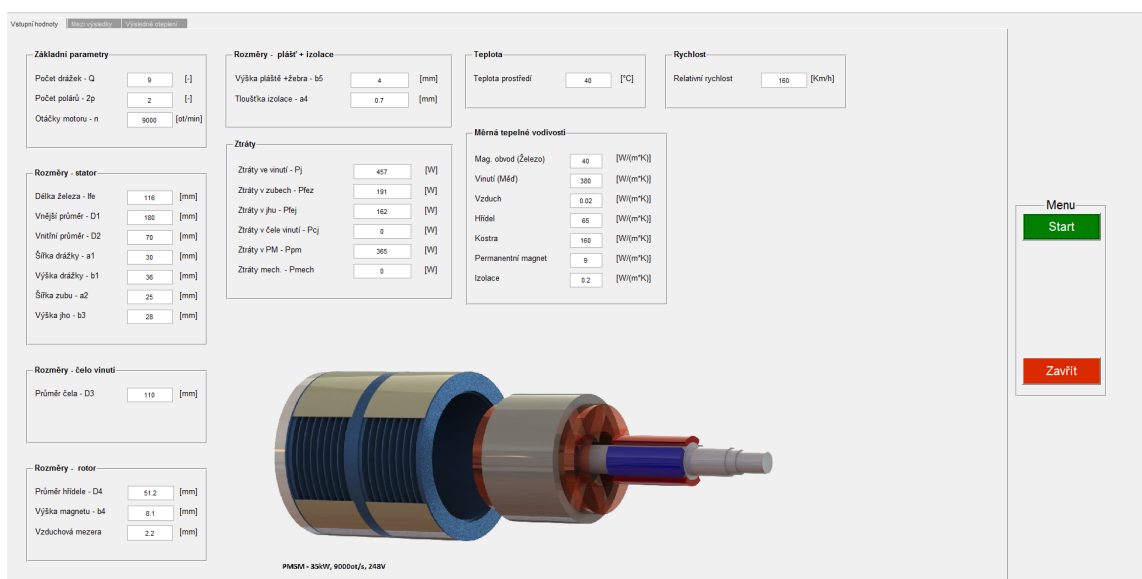
Obr. 6.4: GUI editor

### Uložení dat do Workspace

V případě potřeby manipulace s výslednými daty z GUI je třeba data uložit do Workspace, tento proces se neprovádí automaticky, je třeba ho vykonat pro každou proměnou zvlášť příkazem `assignin('base', 'navez_promene_gui', navez_promene_Workspace)` doporučuji název proměnných nechávat stejný pro GUI i Workspace. Pro zpětné načtení dat z Workspace do GUI existuje příkaz `navez_promene=evalin('base', 'navez_promene_Workspace')`.

## 6.2 Popis výpočtového programu

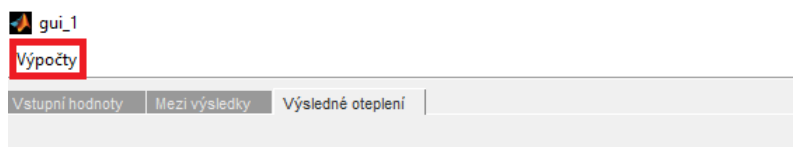
Struktura programu je uspořádaná do tří hlavních záložek, které umožňují přehledná zadávání dat a vyhledávat vypočtené hodnoty. Při stisknutí tlačítka Start program nejprve



Obr. 6.5: Struktura programu

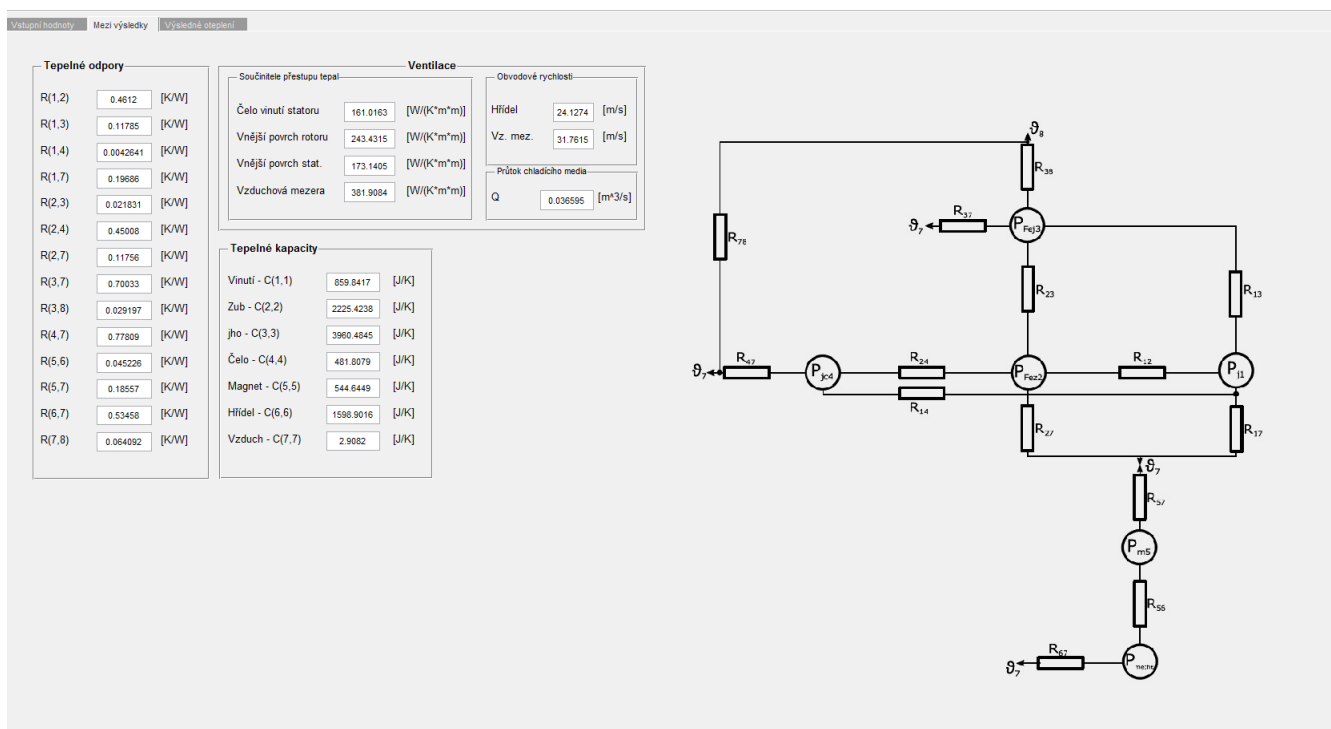
nače vyplněná vstupní data, mezi něž patří rozměry stroje, materiálové konstanty, ztráty, počáteční teplota, relativní rychlost. Dále následuje ventilační výpočet který dopočte součinitele přestupu tepla. Po ventilačním výpočtu se provede výpočet tepelných odporů a tepelných kapacit, pomocí nichž jsou sestavené matice potřebné pro tepelný výpočet.

Dále horní lišta obsahuje tlačítko Výpočty (obr.6.6). Při stisknutí toho tlačítka se spustí pdf soubor, který obsahuje přehled všech výpočtů použitých pro výpočet tepelných odporů. Stejný přehled se nachází v příloze. Při spuštění programu je nastavena jako



Obr. 6.6: Přehled karet

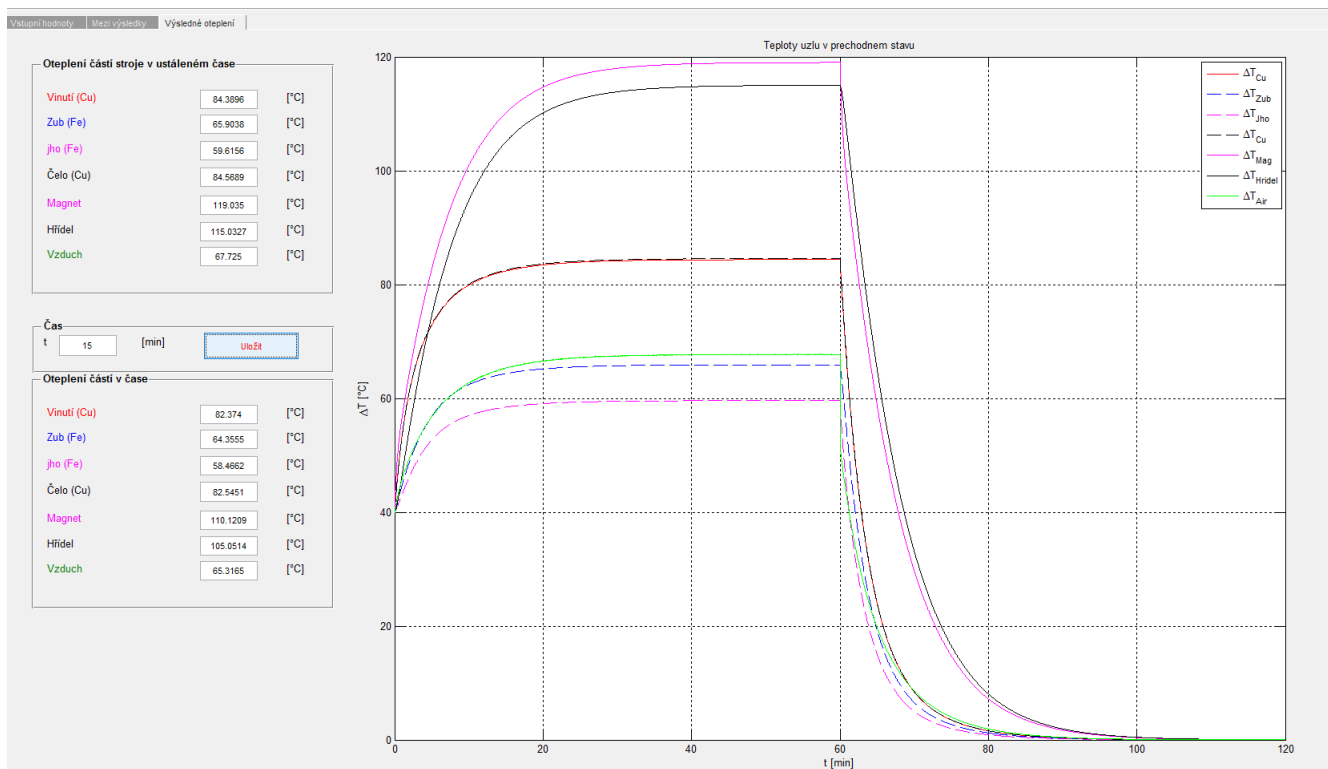
výchozí záložka Vstupní hodnoty, která je rozdělena do dílčích boxů podle částí stroje (stator, rotor, čelo, plášť) a podle typu zadávaných veličin (ztráty, vodivosti, teplota, rychlost).



Obr. 6.7: Záložka mezi výsledky

Záložka Mezi výsledky (obr.6.7) obsahuje přehled jednotlivých tepelných odporů, dále obsahuje tepelnou síť totožnou s obr.4.1, ventilační výpočty a přehled tepelných kapacit. Tato záložka je velmi důležitá při aplikování programu na jiný stroj, pro korekturu výpočtů.

Výsledky oteplení celého výpočtu se generují do poslední záložky Výsledné oteplení (obr.6.5). Tato záložka obsahuje dva boxy pro zobrazení výsledků, v prvním boxu s názvem



Obr. 6.8: Záložka výsledky

Oteplení částí stroje v ustáleném čase se generují výsledky jednotlivých teplot částí (uzlů) stroje automaticky po zmáčknutí tlačítka Start. Pro zobrazení výsledků v boxu s názvem *Oteplení částí v čase* je potřebné nejprve nastavit čas ve kterém chceme teplotu znát a zmáčknout tlačítko uložit, tato možnost je omezena na časový interval od 1[*min*] do 120[*min*]. Graf zobrazující průběhy oteplení jednotlivých částí stroje v čase se dá rozdělit do dvou částí, první část do 60[*min*] popisuje stav oteplení, druhá část popisuje postupné chladnutí stroje při odpojení napájení, tento děj probíhá do 120[*min*]. V případě potřeby se dají tyto časy upravit.

## 6.3 Editace

Editace uvedeného programu se dá rozdělit na dvě části, první část zabývající se výpočtem a druhá část týkající se grafického rozhraní (GUI). Dále rozebereme postupně editaci jednotlivých částí.

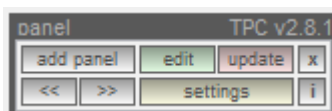
### Výpočet

M-file obsahující výpočtoví skript má název `vypocet.m`. Veškeré výsledky jsou generovány tímto skriptem. Pro lepší přehled při editaci jsou výpočty všech tepelných odporů obsahem přílohy. Při editaci je nutné zachovat názvy proměnných, v případě změny by nebylo možné použít GUI. Jelikož skript neobsahuje vstupní proměnné, tak jsou zde vypsány

```
-----Základní parametry-----
Q = počet drážek
p = počet pólu
n = otáčky za min
-----Stator-----
lfe = délka železa
D_vnejsi = vnější průměr
D_vnitřni = vnitřní průměr
b_drazka = šířka drážky
h_drazka = výška drážky
b_zub = šířka zubu
h_zub = výška zubu
h_jho = výška jho
delta = vzduchová mezera
-----Rotor-----
D_rot_podmag = průměr hřídele rotoru pod magnetem
h_mag = výška magnetu
-----Čelo vinutí-----
D_st_celo = střední průměr čela
-----Nastavení pláště-----
h_kostra = výška pláště + zebra
b_izol = šířka izolace
-----Ztráty-----
p_1 = ztráty v uzlu 1 Pj ve vinutí
p_2 = ztráty v uzlu 2 PFez v zubech
p_3 = traty v uzlu 3 PFej v jhu
p_5 = ztráty v uzlu 5 Pm v PM
p_6 = ztráty v uzlu 6 Pmech na hřídeli
tep_poc = teplota okolí
-----Součinitele tepelné vodivosti-----
lam_fe = Součinitel tepelné vodivosti Fe
lam_cu = Součinitel tepelné vodivosti (vinutí) Cu
lam_iz = Součinitel tepelné vodivosti izolace
lam_fek = Součinitel tepelné vodivosti hřídele
lam_al = Součinitel tepelné vodivosti kostry
lam_mag = Součinitel tepelné vodivosti magnetu
lam_air = Součinitel tepelné vodivosti air
```

## Grafické rozhraní

Úpravu grafického rozhraní nelze provádět v příliš velkém rozrahu, z důvodu použití více záložkové struktury. Pro vytvoření záložek byl použit program již zmíněný program `TabPanelKonstruktor`. Z důvodu použití toho programu pro editaci karet nelze u karet editovat jméno a velikost. Vnitřní obsah lze editovat použitím příkazu `tabpanel('gui_1.fig', 'panel')`, tento příkaz otevře GUI s panelem TPC (obr.6.9). Poté je nutno vybrat příslušnou kartu u které bude prováděna úprava a na panelu TPC vybrat možnost *edit*. Následně se otevře klasický GUI editor. Po ukončení úprav je nutné vše uložit zavřít GUI editor a v TPC zvolit možnost *update*, tato možnost aktualizuje M-file s GUI, v našem případě `gui_1.m`.



**Obr. 6.9:** Tab Panel Konstruktor



# 7

## Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vytvořit výpočtový program ventilace a oteplení synchronních strojů s uživatelským rozhraním v programu Matlab. Program byl navrhnout pro konkrétní synchronní stroj s permanentními magnety typu:  $PMSM - P = 35[kW], n = 9000[ot/s], U = 248[V]$ , na němž byla ověřena jeho funkčnost.

Začátek práce se věnuje stručnému popisu základních teoretických vztahů v oboru termomechaniky. Popisuje základní způsoby sdílení tepla a výpočet součinitelů přestupu tepla. Určení vztahů pro výpočet součinitele přestupu tepla je u elektrických strojů značně obtížné, proto byli převzaty z diplomové práce [10].

Následující kapitoly se věnují ztrátám v elektrikám stroji a tepelným výpočtům metodou náhradní tepelné sítě. Kapitola Ztráty v synchronním stroji seznamuje se základními výpočty ztrát jednotlivých částí stroje, které byly použity v tepelných výpočtech. Kapitola věnovaná tepelnému výpočtu se zabývá metodou náhradní tepelné sítě a výpočtem tepelných odporů. V stejné kapitole byla navrhnutá tepelná síť pro již zmíněný motoru. Síť se skládá z 6 uzlů, 14 tepelných odporů a 2 míst odvodu tepla.

Výpočtový program byl vytvořen na základě znalostí z teoretické části této práce. Funkci programu a uživatelskému rozhraní se věnuje poslední kapitola, která také popisuje možnost případné editace.

Na závěr práce je třeba zdůraznit že program je aplikovatelný pouze na axiální symetrický stroj s permanentními magnety. V budoucnu plánuji rozšíření programu tak, aby byl použitelný na všechny druhy synchronních strojů, dále bych chtěl přidat simulaci oteplení při různých provozních stavech stroje.

# Literatura

- [1] I. P. Kopylov, a kolektiv. *Stavba elektrických strojů* Praha: SNTL, 1988.
- [2] E. Wiedemann, W.Kellenberger. *Konstrukce elektrických strojů* Praha: SNTL, 1973.
- [3] C. Huynh, L Zheng, D Acharya. *Losses in High Speed Permanent Magnet Machines Used in Microturbine Applications* DOI: 10.1115/1.2982151 Dostupné z: <http://www.calnetix.com/sites/default/files/70.pdf>
- [4] X. Wu, R. Wrobel, P. H. Mellor, C. Zhang. *A Computationally Efficient PM Power Loss Mapping for Brushless AC PM Machines With Surface-Mounted PM Rotor Construction* IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 12, pp. 7391-7401, Dec. 2015.
- [5] P. Batoň. *Tepelní analýza synchronního stroje* Brno. Diplomová práce. VUT FEEC v Brně, 2013.
- [6] R. Vlach. *Tepelné procesy v mechatronických soustavách* Brno : VUT v Brně, 2007.
- [7] V. List, J. Hak. *Elektrotechnika 2- Elektrické stroje část.1* Praha: SNTL, 1969.
- [8] G. N. Petrov. *Elektrické stroje 2* Praha: Academia, 1982.
- [9] R. Deeb, *Thermal calculations of permanent magnets motors in high current technology* Brno. Dizertační práce. VUT FEEC v Brně, 2013.
- [10] P. Kolář. *Program pro výpočet ventilace a oteplení synchronních stroju* Brno. Diplomová práce. VUT FEEC v Brně, 2009.
- [11] J. Koláček, K. Konečná. *Jak pracovat s MATLABem [online]* Dostupné z: <https://www.math.muni.cz/kolacek/vyuka/vypsyst/navod.pdf>
- [12] E. Taraja. *TabPanel Constructor v2.8. Elmar Tarajan [online]* [vid. 2002-05-24] Dostupné z: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/1741-tab-panel-example>

# Příloha A

## Výpočet odporů

### A.1 R(12) Zub - Vinutí

1.

$$R_{zubax} = \frac{a_2/2}{S_{zubax} \cdot \lambda_{Fe}} \quad [K/W] \quad (A.1)$$

2.

$$S_{zubax} = l_{Fe} \cdot b_2 \quad (A.2)$$

- $b_2$  – výška zubu
- $a_2$  – šířka zubu
- $l_{Fe}$  – délka železa

3.

$$R_{izolax} = \frac{a_4}{S_{zubax} \cdot \lambda_{izol}} \quad [K/W] \quad (A.3)$$

- $a_4$  – tloušťka izolace

4.

$$R_{zubax} = \frac{a_1/2}{S_{zubax} \cdot \lambda_{Cu}} \quad [K/W] \quad (A.4)$$

- $a_1$  – šířka drážky

5.

$$R_{12} = \frac{R_{vinax} + R_{zubax} + R_{izolax}}{2} \quad (A.5)$$

## A.2 R(13) Vinutí - jho

1.

$$R_{vinrad} = \frac{b_2/2}{S_{vinrad} \cdot \lambda_{Cu}} \quad [K/W] \quad (A.6)$$

2.

$$S_{vinrad} = Q \cdot l_{Fe} \cdot a_1 \quad (A.7)$$

3.

$$R_{izolrad} = \frac{a_4}{S_{vinrad} \cdot \lambda_{izol}} \quad [K/W] \quad (A.8)$$

4.

$$R_{jhorad1} = \frac{(D_1 - (D_2 + 2 \cdot b_2))/4}{S_{jhorad1} \cdot \lambda_{Fe}} \quad [K/W] \quad (A.9)$$

- $D_1$  – Vnější průměr
- $D_2$  – Vnitřní průměr

5.

$$S_{jhorad1} = l_{Fe} \cdot (D_2 + b_2 \cdot 2) \cdot \pi \quad (A.10)$$

6.

$$R_{23} = R_{jhorad1} + R_{vinrad} + R_{izolrad} \quad (A.11)$$

## A.3 R(14) Vinutí - čelo

1.

$$R_{vin} = \frac{\frac{l_{Fe}}{2} + \frac{l_c}{2}}{3 \cdot S_{vin} \cdot \lambda_{Cu}} \quad [K/W] \quad (A.12)$$

- $l_c$  – Délka čela

2.

$$S_{vin} = (a_1 - a_4) \cdot (b_1 - a_4) \cdot Q \quad (A.13)$$

- $Q$  – počet drážek

3.

$$R_{14} = \frac{1}{\frac{1}{R_{vin}} + \frac{1}{R_{vin}}} \quad (A.14)$$

## A.4 R(17) Vinutí - vzduchová mezera

1.

$$R_{prestup1} = \frac{1}{S_{vinrad} \cdot \alpha_1} \quad [K/W] \quad (A.15)$$

- $\alpha_1$  – součinitel přestupu tepla do vzduchové mezery viz kap. 5

2.

$$R_{17} = R_{vinrad} + R_{prestup1} + R_{izolrad} \quad (A.16)$$

## A.5 R(23) Zub - jho

1.

$$R_{zubrad} = \frac{b_2/2}{S_{zubrad} \cdot \lambda_{Fe}} \quad [K/W] \quad (A.17)$$

$$S_{zubrad} = Q \cdot l_{Fe} \cdot a_2 \quad (A.18)$$

2.

$$R_{jhorad1} = \frac{(D_1 - (D_2 + 2 \cdot b_2))/4}{S_{jhorad1} \cdot \lambda_{Fe}} \quad [K/W] \quad (A.19)$$

3.

$$S_{jhorad1} = l_{Fe} \cdot (D_2 + b_2 \cdot 2) \cdot \pi \quad (A.20)$$

4.

$$R_{13} = R_{jhorad1} + R_{zubrad} \quad (A.21)$$

## A.6 R(27) Zub - vzduchová mezera

1.

$$R_{prestup2} = \frac{1}{S_{zubrad} \cdot \alpha_1} \quad [K/W] \quad (A.22)$$

2.

$$R_{27} = R_{zubrad} + R_{prestup2} \quad (A.23)$$

## A.7 R(24) Zub - čelo

1.

$$R_{zub} = \frac{l_{Fe}/2}{S_{zub} \cdot \lambda_{Fe} \cdot 0,2} \quad [K/W] \quad (A.24)$$

2.

$$S_{jhoax} = b_2 \cdot a_2 \cdot Q \quad (A.25)$$

3.

$$R_{cel1} = \frac{\frac{a_1}{2} + a_4}{S_{zub} \cdot \lambda_{Cu}} \quad [K/W] \quad (A.26)$$

4.

$$R_{24} = \frac{R_{zub} + R_{cel1}}{2} \quad (A.27)$$

## A.8 R(38) jho - okolí

1.

$$R_{jhorad2} = \frac{(D_1 - (D_2 + 2 \cdot b_2))/4}{S_{jhorad2} \cdot \lambda_{Fe}} \quad [K/W] \quad (A.28)$$

2.

$$S_{jhorad2} = l_{fe} \cdot D_1 \cdot \pi \quad (A.29)$$

3.

$$R_{kostry} = \frac{b_5}{S_{kostry} \cdot \lambda_{Al}} \quad [K/W] \quad (A.30)$$

- $b_5$  – výška kostry + žebra

4.

$$S_{kostry} = ((l_{Fe} + 2 \cdot l_c) \cdot ((D_1 + (2 \cdot b_5)) \cdot \pi \cdot 1,4)) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot (D_1^2 - D_3^2)\right) \quad (A.31)$$

- $D_3$  – průměr hřídele

5.

$$R_{prestup3} = \frac{1}{S_{kostry} \cdot \alpha_2} \quad [K/W] \quad (A.32)$$

- $\alpha_2$  – součinitel přestupu tepla vnější povrch statorového svazku vit kap. 5

6.

$$R_{38} = R_{jhorad2} + R_{kostry} + R_{prestup3} \quad (A.33)$$

## A.9 R(37) jho - vzduch axiální

1.

$$R_{jhoax} = \frac{l_{Fe}/2}{S_{jhoax} \cdot \lambda_{Fe} \cdot 0,2} \quad [K/W] \quad (A.34)$$

2.

$$S_{jhoax} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_1^2 - (D_2 + 2 \cdot b_2)^2) \quad (A.35)$$

3.

$$R_{prestup5} = \frac{1}{S_{jhoax} \cdot \alpha_3} \quad [K/W] \quad (A.36)$$

- $\alpha_3$  – součinitel přestupu tepla čelo vinutí stator vit kap. 5

4.

$$R_{37} = \frac{R_{jhoax} + R_{prestup5}}{2} \quad (A.37)$$

## A.10 R(47) čelo - vzduch

1.

$$R_{cel} = \frac{a_4}{S_{cel} \cdot \lambda_{izo}} \quad [K/W] \quad (A.38)$$

2.

$$S_{cel} = l_c \cdot ((a_1 \cdot 2) + b_2) \quad (A.39)$$

3.

$$R_{prestup4} = \frac{1}{S_{cel} \cdot \alpha_2} \quad [K/W] \quad (A.40)$$

4.

$$R_{47} = \frac{R_{cel} + R_{prestup4}}{2} \quad (A.41)$$

## A.11 R(57) magnet - vzduchová mezera

1.

$$R_{mag1} = \frac{b_4/2}{S_{mag1} \cdot \lambda_{Mag}} \quad [K/W] \quad (A.42)$$

2.

$$S_{mag1} = (D_3 \cdot +2 \cdot b_4) \cdot \pi \cdot l_{Fe} \quad (A.43)$$

- $b_4$  – výška magnetu
- $D_3$  – průměr hřídele

3.

$$R_{prestup6} = \frac{1}{S_{mag1} \cdot \alpha_4} \quad [K/W] \quad (A.44)$$

- $\alpha_4$  – součinitel přestupu tepla vnější povrch rotoru vit kap. 5

4.

$$R_{57} = R_{mag1} + R_{prestup6} \quad (A.45)$$

## A.12 R(65) magnet - hřídel

1.

$$R_{mag2} = \frac{b_4/2}{S_{mag2} \cdot \lambda_{Mag}} \quad [K/W] \quad (A.46)$$

2.

$$S_{mag2} = D_3 \cdot \pi \cdot l_{Fe} \quad (A.47)$$

3.

$$R_{hr1} = \frac{D_3/2}{S_{mag2} \cdot \lambda_{Mag}} \quad [K/W] \quad (A.48)$$

4.

$$R_{65} = R_{mag2} + R_{hr1} \quad (A.49)$$

## A.13 R(67) hřídel - vzduch

1.

$$R_{hr2} = \frac{\frac{l_{Fe}}{2} + \frac{l_c}{2}}{S_{hr2} \cdot \lambda_{Fe}} \quad [K/W] \quad (A.50)$$

2.

$$S_{hr2} = \frac{\pi}{4} \cdot D_3^2 \quad (A.51)$$

3.

$$R_{prestup7} = \frac{1}{(D_3 \cdot \pi \cdot l_c) \cdot \alpha_4} \quad [K/W] \quad (A.52)$$

4.

$$R_{67} = R_{hr2} + R_{prestup7} \quad (A.53)$$

5.

$$R_{67} = \frac{R_{67} \cdot R_{67}}{R_{67} + R_{67}} \quad (A.54)$$



## A.14 R(78) vzduch - okolí

1.

$$R_{78} = \frac{1}{(S_{pr8} \cdot \alpha_3)} \quad [K/W] \quad (A.55)$$

2.

$$S_{78} = (2 \cdot l_c \cdot D_1 \cdot \pi) + \left(\frac{\pi}{4} \cdot (D_1^2 - D_3^2)\right) \quad (A.56)$$