



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## TEPLOTNÍ ANALÝZA MALÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU

THERMAL ANALYSIS OF A SMALL INDUCTION MACHINE

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marek Holcman

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Mach, Ph.D.

BRNO 2018

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Marek Holcman

**ID:** 186080

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2017/18

## NÁZEV TÉMATU:

### Teplotní analýza malého asynchronního motoru

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Pomocí měření určete ztráty skutečného stroje, výsledky porovnejte s výpočty provedenými pomocí programu RMxprt.
2. Naměřené ztráty použijte pro výpočet teplot daného stroje.
3. Proveďte laboratorní měření teplot daného stroje.
4. Výsledky měření a výpočtů porovnejte.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] KOPYLOV, Igor Petrovič. Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 685 s.
- [2] PYRHONEN, J.; JOKINEN t.; HRABOVCOVÁ V. Design of rotating electrical machines. John Wiley and Sons, 2007. ISBN 978-0-470-69516-6.
- [3] BOLDEA, I. a NASAR, S. A. The induction machine handbook. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 08-49-0004-5.

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 28.5.2018

**Vedoucí práce:** Ing. Martin Mach, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

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

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá teplotní analýzou malého asynchronního motoru s výkonem 600 W. Ztráty motoru byly určeny nejprve pomocí programu RMxpert, a poté laboratorním měřením. Teploty v motoru jsou vypočítány metodou tepelných odporů. Pro analytický výpočet teplot motoru byl vytvořen jednoduchý program pomocí výpočtového programu Matlab. Pomocí vytvořeného programu a určených ztrát byly vypočítány teploty motoru, které byly poté ověřeny měřením.

## **Klíčová slova**

Tepelná síť; teplota; měření teploty; asynchronní motor; ANSYS RMxpert; ztráty; Matlab.

## **Abstract**

This thesis deals with the thermal analysis of a small asynchronous motor with a power of 600 W. The motor losses were determined first by the program RMxpert, and then by laboratory measurement. Temperatures in engine are calculated using the thermal resistance method. For analytical calculation of motor temperatures, a simple program was created using the Matlab computation program. Using the created program and determined losses, engine temperatures were calculated, which were then verified by measurement.

## **Keywords**

Thermal network; temperature; temperature measurement; asynchronous motor; ANSYS RMxpert; losses; Matlab.

## **Bibliografická citace:**

HOLCMAN, M. *Teplotní analýza malého asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 51 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Mach, Ph.D..

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Teplotní analýza malého asynchronního motoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 28. května 2018

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Machovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 28. května 2018

.....  
podpis autora

# Obsah

1	Úvod .....	1
2	Sdílení tepla .....	2
2.1	Vedení tepla .....	2
2.2	Záření tepla .....	3
2.3	Proudění tepla.....	3
3	Asynchronní motory.....	5
3.1	Význam a použití.....	5
3.2	Konstrukce .....	5
3.2.1	Stator.....	5
3.2.2	Rotor .....	6
3.2.3	Kostra .....	6
4	Ztráty a účinnost asynchronního stroje.....	7
4.1	Ztráty ve vinutích.....	8
4.2	Ztráty v železe .....	8
4.3	Mechanické ztráty .....	8
4.4	Dodatečné ztráty při zatížení.....	9
4.5	Celkové ztráty a účinnost stroje.....	9
5	Tepelný výpočet pomocí metody tepelných odporů .....	10
5.1	Náhradní tepelný model .....	10
5.1.1	Pro uzavřené stroje s povrchovým chlazením.....	10
5.1.2	Rozšířený tepelný model .....	11
5.2	Výpočet tepelných odporů .....	13
6	Určení ztrát motoru .....	19
6.1	Parametry motoru.....	19
6.2	Výpočet ztrát pomocí programu RMxpert .....	20
6.3	Měření ztrát asynchronního motoru.....	21
6.3.1	Měření křivky zatížení .....	21
6.3.2	Měření naprázdno.....	23
6.3.3	Účinnost motoru.....	23
6.3.4	Výsledky měření.....	24
7	Určení teplot motoru.....	26
7.1	Výpočet metodou tepelných odporů.....	26
7.1.1	Výpočet tepelných odporů .....	26
7.1.2	Program .....	30
7.2	Praktické měření.....	31
7.3	Výsledky .....	32
8	Závěr .....	34

Použitá literatura .....	36
Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	37
Přílohy .....	40

## Seznam obrázků

obr. 2.1: Sdílení tepla v motoru.....	4
obr. 3.1: Asynchronní motor s kotvou nakrátko .....	6
obr. 4.1: Rozložení toku výkonu v asynchronním motoru .....	7
obr. 5.1: Náhradní tepelné schéma pro uzavřený motor s povrchovým chlazením	11
obr. 5.2: Rozšířený tepelný model asynchronního motoru .....	12
obr. 5.3: Součinitel přestupu tepla v závislosti na rychlosti vzduchu.....	17
obr. 6.1: Motor Atas s výkonem 600 W.....	19
obr. 6.2: Ukázka programu ANSYS Maxwell RMXprt.....	20
obr. 6.3: Závislost jednotlivých ztrát motoru na výstupním výkonu .....	25
obr. 7.1: Zjednodušené náhradní tepelné schéma pro uzavřené stroje s povrchovým chlazením .....	30
obr. 7.2: Matice pro výpočet prvního tepelného modelu v programu Matlab.....	31
obr. 7.3: Matice pro výpočet druhého tepelného modelu v programu Matlab .....	31
obr. 7.4: Matice pro výpočet rozšířeného tepelného modelu v programu Matlab ..	31
obr. 7.5: Rozmístění čidel teploty v motoru ze strany hřídele .....	32
P. obr. 1: Měřicí pracoviště .....	40
P. obr. 2: Štítek motoru .....	40
P. obr. 3: Magnetizační křivka plechu M700-50A .....	41



## Seznam tabulek

tab. 5.1: Součinitele přestupu tepla pro ohřátý povrch, který je v ustáleném stavu .....	17
tab. 5.2: Součinitele tepelné vodivosti pro různé materiály .....	18
tab. 6.1: Štítkové údaje motoru .....	19
tab. 6.2: Vypočítané parametry motoru pomocí programu RMxpr .....	21
tab. 6.3: Naměřené hodnoty při měření křivky zatížení .....	24
tab. 6.4: Naměřené a vypočítané hodnoty pro měření naprázdno .....	24
tab. 6.5: Porovnání vypočítaných ztrát pomocí RMxpřt s naměřenými ztrátami ...	24
tab. 6.6: Vypočítané ztráty pro různé zatížení motoru .....	25
tab. 7.1: Vstupní parametry potřebné pro výpočty .....	26
tab. 7.2: Výsledky měření teplot .....	32
tab. 7.3: Vypočítané teploty motoru pomocí zjednodušených tepelných modelů ...	32
tab. 7.4: Vypočítané teploty motoru pomocí rozšířeného tepelného modelu .....	33
tab. 7.5: Porovnání některých naměřených a vypočítaných teplot motoru .....	33
P. tab. 1: Převodní tabulka teplotního čidla Pt 100 .....	42

# 1 ÚVOD

Výpočet teplot v motoru je důležitý při návrhu, kdy je nutné znát teploty různých částí z důvodu optimalizace použitých materiálů. Při překročení maximálních dovolených teplot by mohlo dojít až k nevratnému poškození stroje, kdy vysoká teplota poškodí izolace elektrických částí stroje. Proto je nutné toto vyloučit už ve fázi vývoje stroje.

Výpočet teplot se zakládá na analytickém výpočtu elektrického obvodu, kdy rezistory nahradí různé tepelné odpory, které reprezentují části motoru. Zdrojem proudu jsou elektrické a mechanické ztráty, které způsobují oteplení částí motoru. Pomocí těchto prvků je vytvořena tepelná síť daného stroje, ve které je poté možné vypočítat teploty v různých uzlech. Velkou nevýhodou této metody je obtížný výpočet tepelných odporů, kdy je nutné zohlednit různé tepelné vlivy a vazby ve stroji, což vyžaduje určitou praxi. Veškeré výpočty tepelných odporů vycházejí ze zdroje [1].

Pro určení teplot je nutné znát rozložení ztrát v motoru. Ztráty jsou určeny dvěma způsoby. Nejprve pomocí profesionálního programu RMXprt, a poté jsou ověřeny laboratorním měřením. Pro měření ztrát byla použita norma ČSN EN 60034-2-1 ed. 2 [2].

Pro výpočet teplot byl vytvořen program na řešení elektrických obvodů pomocí metody uzlových napětí. Pro tento účel byl zvolen program Matlab. Teploty v motoru byly počítány jak pro ztráty určené v programu RMXprt, tak i pro ztráty určené měřením. Vypočítané teploty byly ověřeny laboratorním měřením. Výsledné teploty jsou porovnány v závěru práce.

## 2 SDÍLENÍ TEPLA

Odvod ztrátového výkonu v podobě tepla do chladicího prostředí se děje díky tepelné vodivosti jednotlivých částí stroje a sdílení tepla z ochlazujících ploch. Jako chladicí médium se u motorů nejčastěji používá vzduch. Existují 3 druhy předávání tepla a to [3]:

- vedením,
- zářením,
- prouděním

### 2.1 Vedení tepla

Vedení tepla je z fyzikálního hlediska šíření mechanických podob energie v mikroskopické struktuře látky. Směr pohybu tepelného toku energie probíhá od místa s vyšší teplotou k místu s nižší teplotou. Tento přenos tepla plochou popisuje Fourierův zákon [3]:

$$p = -\lambda \cdot A \cdot \text{grad } \vartheta \quad (2.1)$$

Kde:

$p$	Tepelný tok	[W]
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$A$	Průřez tepelného toku	[m <sup>2</sup> ]
$\text{grad } \vartheta$	Tepelný gradient	[K·m <sup>-1</sup> ]

V rovnici (2.1) znaménko mínus je proto, že při kladném směru tepelného toku má gradient teploty záporné znaménko. V tomto směru toku tepla se teplota snižuje.

V tělese se obvykle uplatňuje vedení tepla trojrozměrně. V praxi lze v některých případech uvažovat jenom jeden směr šíření tepla. Poté se výpočet podstatně zjednoduší. Při šíření tepla jenom ve směru osy  $x$  uvažujeme vztah [3]:

$$\text{grad } \vartheta = \frac{d\vartheta}{dx} \quad (2.2)$$

Poté rovnici (2.1) zjednodušíme na tvar:

$$p = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta\vartheta}{l} \quad (2.3)$$

Kde:

$\Delta\vartheta$	Rozdíl teplot v tělese	[K]
$l$	Délka tělesa	[m]

## 2.2 Záření tepla

Pro tento druh přenosu tepla není potřeba žádné chladicí médium. Teplo se šíří vyzařováním tepelných paprsků. Tento jev popisuje Stefan-Boltzmannův zákon, který vyjadřuje vyzářenou energii v závislosti na teplotě povrchu daného tělesa [3].

$$p = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.4)$$

Kde:

$\varepsilon$	Emisivita	[-]
$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$	[W·K <sup>-4</sup> ·m <sup>-2</sup> ]
$T_1$	Teplota povrchu	[K]
$T_2$	Teplota okolí	[K]
$S$	Povrch tělesa	[m <sup>2</sup> ]

Emisivita  $\varepsilon$  má hodnotu od 0 do 1. Je závislá na použitém materiálu, drsnosti povrchu, barvě povrchu atd. Litina má hodnotu emisivitu  $\varepsilon = 0,3$ , lesklá měď  $\varepsilon = 0,025$ , lesklý hliník  $\varepsilon = 0,04$ . Při černě natřeném povrchu je  $\varepsilon = 0,9 - 0,95$ . Absolutně černé těleso má emisivitu rovnu 1 [3].

## 2.3 Proudění tepla

Sdílení tepla prouděním se děje ohřátím chladicího média povrchem chlazeného tělesa a jeho následným pohybem. Tento pohyb může nastat přirozeně, ale z důvodu většího odvodu tepla většinou využíváme nuceného proudění. Médium může být například vzduch nebo voda. Při použití vzduchu k chlazení se nucené proudění provádí pomocí ventilátoru [3].

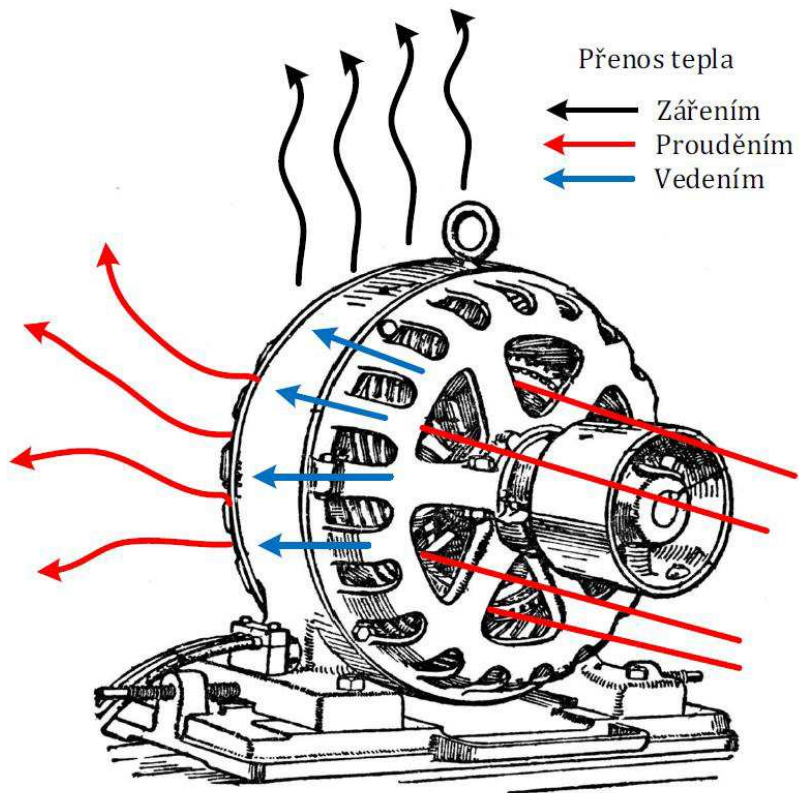
Proudění tepla definuje Newtonův zákon. Předávání tepla od ohřátého povrchu do chladicího média je dáno vztahem [3]:

$$p = \alpha \cdot (\vartheta - \vartheta_v) \cdot S = \alpha \cdot \Delta\vartheta \cdot S \quad (2.5)$$

Kde:

$\alpha$	Součinitel přestupu tepla přes povrch	[W·K <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ]
$\vartheta$	Teplota ochlazovaného povrchu	[K]
$\vartheta_v$	Teplota chladicího média	[K]
$S$	Plocha ochlazovaného povrchu	[m <sup>2</sup> ]

Sdílení tepla u motoru je znázorněno na obr. 2.1.



obr. 2.1: Sdílení tepla v motoru [4]

## 3 ASYNCHRONNÍ MOTORY

### 3.1 Význam a použití

Asynchronní stroje jsou nejvíce používány jako motory. Je to nejpoužívanější druh elektromotoru, který se používá jako zdroj mechanické energie pro různé pohony a použití. Jejich velkou výhodou je jednoduchost konstrukce, ze které vyplývá nízká cena a dobrá provozní spolehlivost (není nutná velká údržba). K napájení se používá nejčastěji standardní třífázová napájecí soustava.

Tento druh motoru má také nějaké nevýhody. Jednou z nich je obtížná regulace otáček. Možným řešením je změna počtu pólů stroje nebo využití napájení pomocí frekvenčního měniče. Nevýhodou také je indukční účinník  $\cos\varphi$ , který se při zatížení pohybuje mezi 0,8 až 0,9. Při snížení zatížení účinník klesá, a proto asynchronní motory trvale zatěžují napájecí síť jalovým proudem. Další nevýhodou je velký proudový náraz při spouštění stroje.

Princip činnosti je založen na působení elektromagnetických sil točivého magnetického pole v okolí statoru a rotoru. Stator vyvolá točivé magnetické pole, pomocí kterého se do rotoru naindukují proudy a napětí. Toto může nastat pouze při rozdílné rychlosti rotoru od synchronní rychlosti. Proto název asynchronní motor. Někdy se také tyto stroje nazývají indukční [5].

Asynchronní stroje můžeme dělit do dvou skupin, které jsou:

- Motory, které přeměňují elektrickou energii na mechanickou
- Generátory, které mechanickou energii přeměňují na elektrickou

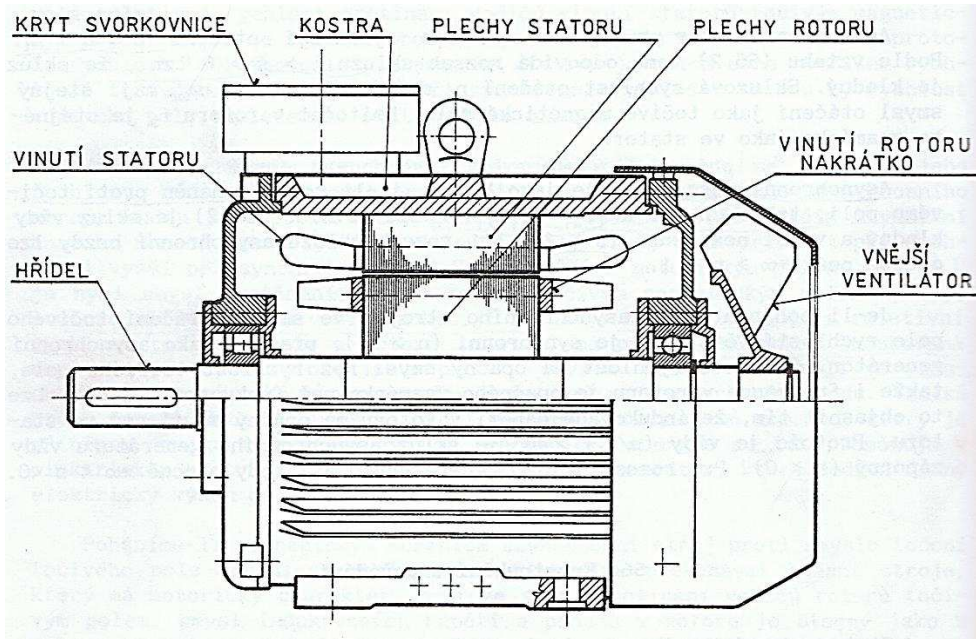
### 3.2 Konstrukce

Motor se skládá ze dvou hlavních částí, jimiž jsou stator a rotor. Stator je statická část stroje a rotor je pohyblivá část stroje. Konstrukce motoru je znázorněna na obr. 3.1.

#### 3.2.1 Stator

Stator se skládá z dynamoplechů o tloušťce nejčastěji 0,5 mm, které jsou nalisovány do kostry stroje. Tyto plechy jsou od sebe vzájemně izolovány lakem nebo papírem z důvodu omezení ztrát vířivými proudy. V drážkách statorového souboru je uloženo nejčastěji třífázové vinutí, kde jsou u dvoupólového stroje v prostoru cívky

vzájemně posunuty o 120°. Vinutí je nejčastěji tvořeno měděným smaltovaným drátem. Začátky a konce vinutí jsou vyvedeny ven z motoru na svorkovnici. Svorkovnice je uspořádána tak, aby umožňovala jednoduchou změnu zapojení vinutí hvězda nebo trojúhelník [5].



obr. 3.1: Asynchronní motor s kotvou nakrátko [5]

### 3.2.2 Rotor

Rotor se skládá také z dynamoplechů o stejné tloušťce. Tento soubor plechů je nalisován na hřídeli stroje. V drážkách jsou uloženy neizolované měděné nebo mosazné vodiče, které jsou na koncích spojeny kruhy nakrátko. U motorů s menším výkonem je v drážkách hliník, který je odlit metodou tlakového lití. U kroužkového motoru se v rotoru nachází třífázové vinutí, jehož konce jsou spojeny do hvězdy a začátky vyvedeny (jak už název motoru napovídá) na kroužky [6].

### 3.2.3 Kostra

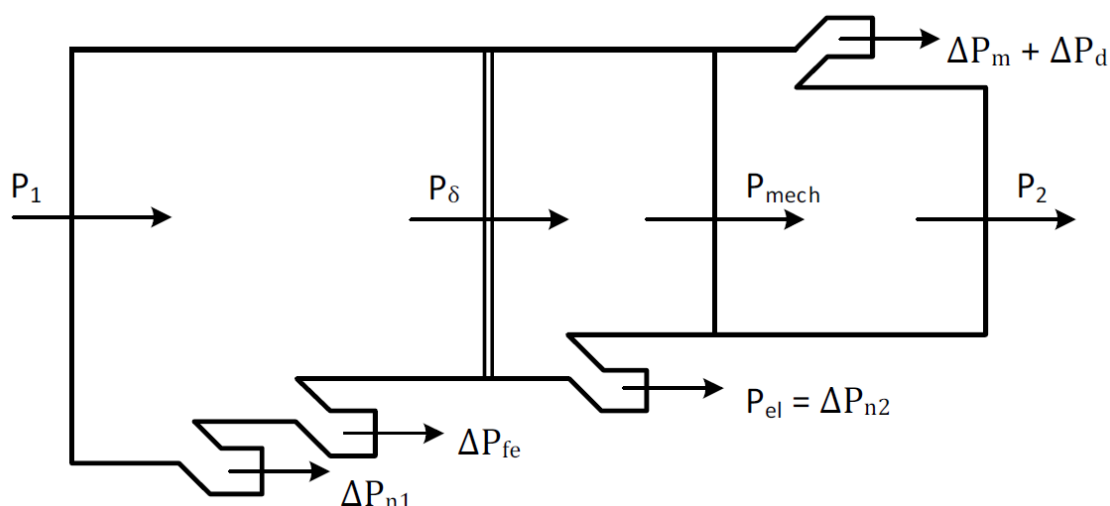
Statorový soubor je uložen v kostře. Kostry mohou být lité, svařované nebo lisované z plechu. Tvar kostry je závislý na druhu krytí stroje. Pro dobrý odvod tepla se na povrchu nachází žebra (zvětší ochlazující plochu stroje). Tato žebra mají většinou výšku asi 15–20 % výšky osy stroje.

Na čelech stroje se nachází ložiskové štíty, ve kterých je uložena hřídel stroje. Na jednom konci hřídele bývá umístěn ventilátor pro ochlazování stroje. Proud vzduchu od ventilátoru usměrňuje kryt ventilátoru směrem k žebrům [1].

## 4 ZTRÁTY A ÚČINNOST ASYNCHRONNÍHO STROJE

Při přeměně elektrické energie na mechanickou vznikají ve stroji různé ztráty, které se mění v teplo. Toto teplo ohřívá jednotlivé části stroje. Ztráty můžeme rozdělit do několika skupin [7]:

- 1) Elektrické ztráty, které jsou způsobeny průtokem proudu ve vinutích stroje (Joulovy ztráty)
- 2) Magnetické ztráty, které jsou způsobeny vířivými proudy a hysterezí (ztráty v železe)
- 3) Mechanické ztráty, které jsou zapříčiněny třením v ložiskách a ventilačními ztrátami
- 4) Dodatečné ztráty



obr. 4.1: Rozložení toku výkonu v asynchronním motoru [4]

Tok výkonu zahrnující ztráty ve stroji je zobrazen na obr. 4.1, kde:

$P_1$	Příkon motoru	[W]
$\Delta P_{n1}$	Joulovy ztráty ve vinutí statoru	[W]
$\Delta P_{fe}$	Ztráty v železe statoru	[W]
$P_\delta$	Výkon přenesený přes vzduchovou mezeru	[W]
$\Delta P_{n2}$	Joulovy ztráty ve vinutí rotoru	[W]
$P_{mech}$	Mechanický výkon	[W]
$\Delta P_m$	Mechanické ztráty (ventilátor, ložiska)	[W]
$\Delta P_d$	Dodatečné ztráty motoru	[W]
$P_2$	Výkon na hřídeli stroje	[W]



Se změnou zatížení se mění i ztráty ve stroji. Podle předpokladu můžeme uvažovat, že jedna část ztrát stroje se mění s kvadrátem protékajícího proudu. Druhá část je přímo úměrná protékajícímu proudu a třetí část je prakticky nezávislá na proudu (ztráty v železe, ztráty mechanické a ztráty dielektrické) za předpokladu stejného napětí a otáček motoru [7].

## 4.1 Ztráty ve vinutích

Tyto ztráty jsou úměrné druhé mocnině proudu procházejícím vinutím (rotoru nebo statoru) a odporem vinutí. Elektrický odpor se počítá podle vztahu pro výpočet odporu v závislosti na délce vodiče, jeho měrném elektrickém odporu a průřezu vodiče [8]. Poté platí, že:

$$\Delta P_n = R_{\vartheta} \cdot I^2 \cdot m \quad (4.1)$$

, kde  $R_{\vartheta}$  je elektrický odpor vinutí přepočtený na danou teplotu,  $m$  je počet fází stroje a  $I$  je proud ve vinutí.

## 4.2 Ztráty v železe

Tyto ztráty se dělí na dvě části: ztráty hysterezní  $\Delta P_h$  a ztráty vířivými proudy  $\Delta P_w$ . Tyto ztráty závisí na kvalitě použité oceli, tloušťce dynamoplechů, na frekvenci a na magnetické indukci. Přesnost výpočtu těchto ztrát není moc velká. Pro výpočet se používá přibližný empirický vzorec [1]:

$$\Delta P_{fe} = k_p \cdot \Delta p_{1,0} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} \cdot B_i^2 \cdot m_i \quad [\text{W}; \text{W} \cdot \text{kg}^{-1}; \text{Hz}; \text{T}; \text{kg}] \quad (4.2)$$

, kde  $k_p$  je činitel, který zahrnuje vliv nerovnoměrnosti indukce apod.,  $\Delta p_{1,0}$  jsou měrné ztráty při indukci 1 T a hmotnosti železa 1 kg (při frekvenci 50 Hz),  $f$  je frekvence magnetování,  $B_i$  je indukce v daném místě ve stroji,  $m_i$  je hmotnost počítané části a  $\beta$  je exponent daný druhem oceli [1].

## 4.3 Mechanické ztráty

V těchto ztrátách jsou zastoupeny ztráty způsobené třením v ložiskách stroje a ztráty způsobené ventilátorem, který ochlazuje motor. Výpočet těchto ztrát je založen na použití empirického vzorce vycházejícího z experimentů. Při výpočtu běžných typů strojů je přesnost výpočtu celkem vysoká.

Pro motor s radiální ventilací (bez dodatečných ventilačních kanálů), který má rotor spojený kruhy nakrátko s přídatnými ventilačními lopatkami, můžeme pro výpočet mechanických ztrát použít přibližný vztah [1]:

$$\Delta P_m \approx K_T \cdot \left(\frac{n}{1000}\right)^2 \cdot (10 \cdot D)^3 \quad (4.3)$$

Tento vztah platí pro motor s vnějším průměrem do 0,25 m, kde:

$D$	Vnější průměr ventilátoru (většinou jako průměr stroje)	[m]
$K_T$	$K_T = 5$ pro dvoupólové motory $K_T = 6$ pro vícepólové motory	[-]
$n$	Počet ventilačních lopatek	[-]

#### 4.4 Dodatečné ztráty při zatížení

Dodatečné ztráty jsou takové, které vznikají ve vodičích vinutí nebo v železe v různých místech magnetického pole. To způsobuje, že se ve vodičích indukují proudy, které způsobují ztráty vířivými proudy. Tyto ztráty nejsou zanesené ve výpočtu ztrát v předchozích bodech. Pro stroje s malým výkonem se však tyto ztráty nepočítají, ale pouze uvažují přibližně. Jmenovitě zatížený motor má tyto ztráty asi 0,5 % z jmenovitého výkonu. Pro jiné zatížení motoru se tyto ztráty počítají v poměru druhé mocniny proudů [1].

$$\Delta P_d = \Delta P_{nd} \cdot \left( \frac{I_1}{I_{1n}} \right)^2 \quad (4.4)$$

Kde:

$\Delta P_{nd}$	Dodatečné ztráty při jmenovitém zatížení	[W]
$I_1$	Jmenovitý proud vinutím statoru	[A]
$I_{1n}$	Proud vinutím statoru	[A]

#### 4.5 Celkové ztráty a účinnost stroje

Celkové ztráty se poté vypočtou podle vztahu [6]:

$$\Delta P = \Delta P_{n1} + \Delta P_{n2} + \Delta P_{fe} + \Delta P_m + \Delta P_d \quad (4.5)$$

Mechanický výkon na hřídeli se poté vypočte podle vztahu [6]:

$$P_2 = P_1 - \Delta P \quad (4.6)$$

Účinnost stroje se vypočte podle vztahu [6]:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P} \quad (4.7)$$

# 5 TEPELNÝ VÝPOČET POMOCÍ METODY TEPELNÝCH ODPORŮ

Metoda tepelných odporů je založena na analytickém řešení elektrických obvodů, kdy tepelné odpory nahrazují jednotlivé části stroje. Výsledkem řešení obvodů jsou střední teploty jednotlivých částí elektrického stroje, které se berou jako jednolitá tělesa [1].

Základní rovnice pro tepelný výpočet [1]:

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = P_{12} \cdot R_{12} \quad (5.1)$$

Kde:

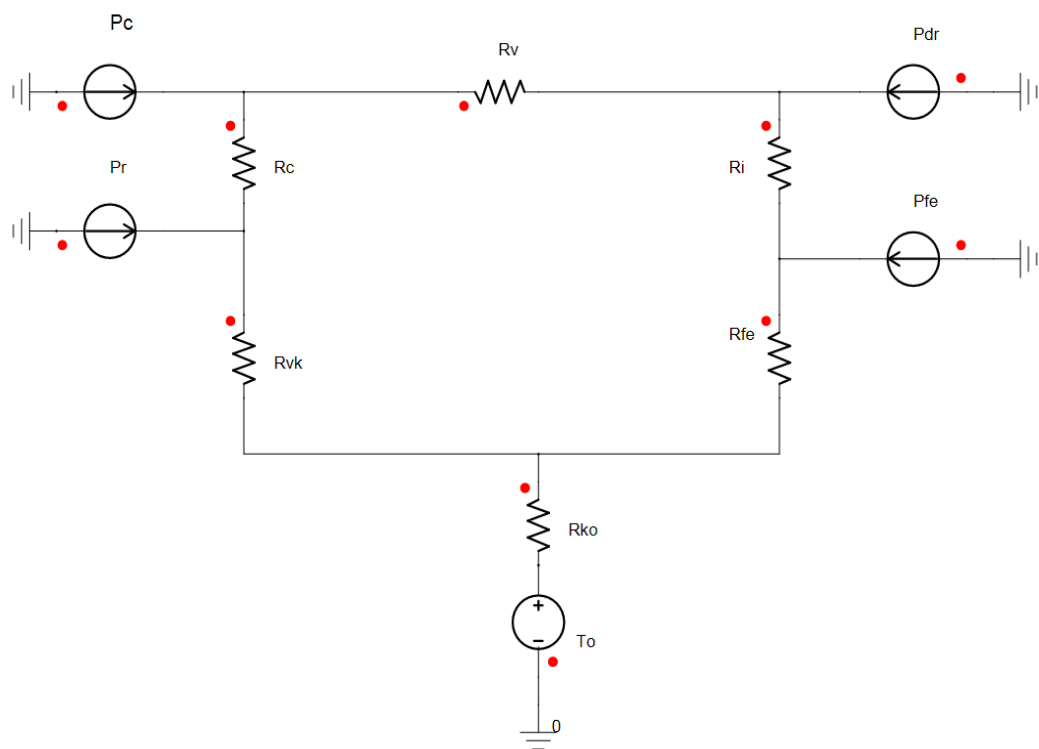
$\vartheta_1, \vartheta_2$	Střední teploty dvou bodů	[K]
$P_{12}$	Teplený tok mezi dvěma body	[W]
$R_{12}$	Tepelný odpor mezi dvěma body	[K·W <sup>-1</sup> ]

Z logiky je zřejmé, že čím více je prvků ve schématu, které charakterizují části stroje, tím větší bude přesnost výpočtu. S počtem prvků ale roste složitost obvodu a tím i jeho výpočet. Při výpočtu je nutné počítat s určitým zjednodušením vstupních údajů, které by však neměly závažně ovlivnit výsledek [1].

## 5.1 Náhradní tepelný model

### 5.1.1 Pro uzavřené stroje s povrchovým chlazením

Pro uzavřené stroje s povrchovým chlazením můžeme uvažovat zjednodušené tepelné schéma. V tomto schématu se uvažuje, že veškeré ztrátové teplo proudí přes statorový svazek a čela motoru do kostry stroje. Tento model uvažuje motor jako symetrické těleso, ve kterém jsou obě poloviny motoru stejné. Výpočet teplot bude proto velmi jednoduchý. Tepelné schéma je znázorněno na obr. 5.1.



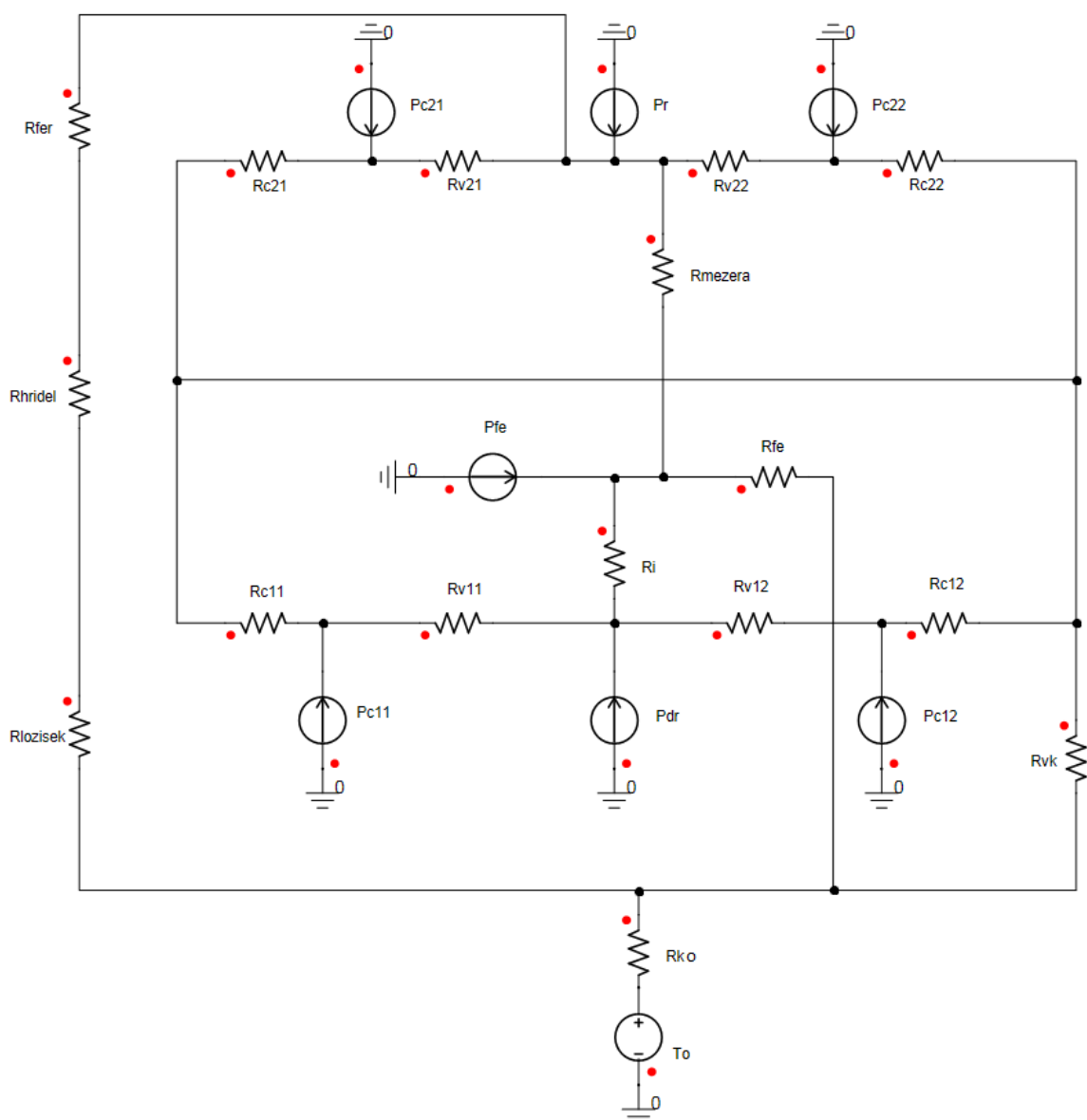
obr. 5.1: Náhradní tepelné schéma pro uzavřený motor s povrchovým chlazením

## 5.1.2 Rozšířený tepelný model

Podle [1] byl vytvořen rozšířený tepelný obvod, který uvažuje více možností šíření tepla ve stroji. Oproti prvnímu modelu (obr. 5.1) obsahuje tento model mnohem více tepelných odporů, proto bude výpočet mnohem složitější. Díky rozsáhlejšímu obvodu lze poté vypočítat teploty ve více bodech motoru. Tento model je znázorněn na obr. 5.2.

Model obsahuje sedm zdrojů ztrátového výkonu:

$P_{c11}$	Ztrátový výkon v čelech statoru od hřídele	[W]
$P_{c12}$	Ztrátový výkon v čelech statoru od ventilátoru	[W]
$P_{c21}$	Ztrátový výkon v čelech rotoru od hřídele	[W]
$P_{c22}$	Ztrátový výkon v čelech rotoru od ventilátoru	[W]
$P_{dr}$	Ztrátový výkon v drážkách statoru	[W]
$P_{fe}$	Ztrátový výkon v železe statoru	[W]
$P_r$	Ztrátový výkon rotoru (mimo čela)	[W]



**obr. 5.2: Rozšířený tepelný model asynchronního motoru**

Dále tepelné schéma obsahuje šestnáct tepelných odporů, které charakterizují dané části stroje, a to:

$R_{c11}$	Tepelný odpor čel statorového vinutí od hřídele	$[K \cdot W^{-1}]$
$R_{c12}$	Tepelný odpor čel statorového vinutí od ventilátoru	$[K \cdot W^{-1}]$
$R_{c21}$	Tepelný odpor čel rotorového vinutí od hřídele	$[K \cdot W^{-1}]$
$R_{c22}$	Tepelný odpor čel rotorového vinutí od ventilátoru	$[K \cdot W^{-1}]$
$R_{v11}$	Tepelný odpor kovu statorového vinutí od hřídele	$[K \cdot W^{-1}]$
$R_{v12}$	Tepelný odpor kovu statorového vinutí od ventilátoru	$[K \cdot W^{-1}]$
$R_{v21}$	Tepelný odpor kovu rotorového vinutí od hřídele	$[K \cdot W^{-1}]$
$R_{v22}$	Tepelný odpor kovu rotorového vinutí od ventilátoru	$[K \cdot W^{-1}]$

$R_i$	Tepelný odpor drážkové izolace statoru	[K·W <sup>-1</sup> ]
$R_{fe}$	Tepelný odpor železa statoru	[K·W <sup>-1</sup> ]
$R_{fer}$	Tepelný odpor železa rotoru	[K·W <sup>-1</sup> ]
$R_{hridel}$	Tepelný odpor hřídele	[K·W <sup>-1</sup> ]
$R_{ložisko}$	Tepelný odpor ložiska	[K·W <sup>-1</sup> ]
$R_{ko}$	Tepelný odpor vnějšího povrchu kostry	[K·W <sup>-1</sup> ]
$R_{vk}$	Tepelný odpor charakterizující tepelný spád mezi vnitřním ohřátým vzduchem a kostrou stroje	[K·W <sup>-1</sup> ]
$R_{mezera}$	Tepelný odpor uvažující vazby mezi rotorem a státorem	[K·W <sup>-1</sup> ]

V obvodu se také nachází zdroj  $T_o$ , který charakterizuje teplotu okolí.

## 5.2 Výpočet tepelných odporů

Všechny vztahy použité v této části tj. (5.2) – (5.19) byly převzaty z [1].

- **Tepelný odpor drážkové izolace  $R_i$**

$$R_i = \frac{b_i}{\lambda_i \cdot S_i} \quad (5.2)$$

Kde:

$b_i$	Tloušťka izolace drážek	[m]
$\lambda_i$	Součinitel tepelné vodivosti izolace	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$S_i$	Plocha izolace	[m <sup>2</sup> ]

- **Tepelný odpor čel vinutí  $R_c$**

$$R_c = \frac{b_c}{\lambda_c \cdot S_c} + \frac{1}{\alpha_c \cdot S_c} \quad (5.3)$$

$$\alpha_c = 10 \cdot (1 + 0,54 \cdot v^2) \quad (5.4)$$

Kde:

$b_c$	Tloušťka izolace vinutí čel	[m]
$\lambda_c$	Součinitel tepelné vodivosti izolace vinutí čel	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$S_c$	Plocha čel	[m <sup>2</sup> ]
$v$	Rychlost vzduchu	[m·s <sup>-1</sup> ]

- **Tepelný odpor kovu vinutí  $R_v$**

$$R_v = \frac{l_1 + l_c}{12 \cdot Q \cdot V_{ef} \cdot S_{ef} \cdot \lambda_z} \quad (5.5)$$

Kde:

$l_1$	Osová délka statorového svazku	[m]
$l_c$	Délka čel	[m]
$Q$	Počet drážek statoru	[-]
$V_{ef}$	Počet vodičů v drážce	[-]
$S_{ef}$	Efektivní průřez vodiče ve vinutí	[m <sup>2</sup> ]
$\lambda_z$	Součinitel tepelné vodivosti kovu vinutí	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]

- **Tepelný odpor železa statoru  $R_{fe}$**

$$R_{jha} = \frac{h_{jhas}}{\lambda_{Fed} \cdot S_j} \quad (5.6)$$

$$S_j \approx S_{er}$$

$$\alpha_{jha} = \frac{\lambda_{Fed}}{h_{jhas}} \quad (5.7)$$

$$R_{fe} = R_{jha} + R_{\delta j} = \frac{1}{S_{er}} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_{jhas}} + \frac{1}{\alpha_{\delta j}} \right) \quad (5.8)$$

Tepelný odpor železa statoru se skládá za dvou částí, a to odporu jha a odporu technologické mezery v místě uložení statoru do kostry. Při výpočtu odporu této mezery uvažujeme činitel pro uzavřené stroje  $\alpha_{\delta j} = 800$  až  $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ .

$R_{jha}$	Odpor jha statoru	[K·W <sup>-1</sup> ]
$R_{\delta j}$	Odpor technologické mezery statoru	[K·W <sup>-1</sup> ]
$S_{er}$	Vnější povrch paketů	[m <sup>2</sup> ]
$\alpha_{jha}$	Činitel podle vztahu (5.7)	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{\delta j}$	Činitel pro výpočet tepelného odporu mezery mezi státorem a kostrou stroje	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_{Fed}$	Součinitel tepelné vodivosti plechu v podélném směru	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$h_{jhas}$	Výška jha statoru	[m]

- **Tepelný odpor  $R_{vk}$**

$$R_{vk} = \frac{1}{\alpha \cdot S_{vk}} \quad (5.9)$$

Kde:

$\alpha$	Součinitel přestupu tepla	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
$S_{vk}$	Vnitřní povrch kostry, který je ofukován vzduchem	$[\text{m}^2]$

Součinitel přestupu tepla se vypočítá podle vztahu (5.10) s použitím činitele  $k_0 = 0,07$  až  $0,05$ .

$$\alpha = \alpha_0 \cdot (1 + k_0 \cdot v_v) \quad (5.10)$$

Kde:

$\alpha_0$	Součinitel přestupu tepla pro uhřátý povrch v ustáleném stavu	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$
$v_v$	Rychlost vzduchu	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

- **Tepelný odpor vzduchové mezery mezi rotorem a statorem**

$$R_\delta = \frac{1}{\alpha_\delta \cdot S_\delta} \quad (5.11)$$

$$\alpha_\delta = [Nu] \cdot \frac{\lambda_v}{2 \cdot \delta} \quad (5.12)$$

$$Nu = \frac{0,212 \cdot f \cdot Re}{1 - \frac{3,81}{f \cdot Re}} \quad (5.13)$$

$$f = \frac{1}{4 \cdot \left[ 1,11 + 2 \cdot \log\left(\frac{\delta}{e}\right) \right]^2} \quad (5.14)$$

$$Re = \frac{v \cdot S_\delta}{\nu} \quad (5.15)$$

Kde:

$S_\delta$	Povrch rotoru	$[\text{m}^2]$
$Nu$	Nusseltovo číslo	$[-]$
$f$	Činitel drsnosti povrchu	$[-]$
$\delta$	Vzduchová mezera mezi rotorem a statorem	$[\text{m}]$
$v$	Obvodová rychlost rotoru	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\nu$	Kinematická vazkost vzduchu	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$



$Re$	Reynoldsovo číslo	[m <sup>2</sup> ]
$e$	Tolerance opracování povrchu rotoru	[m]
$\lambda_v$	Součinitel tepelné vodivosti pro vzduch	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]

- **Tepelný odpor železa rotoru**

$$R_{fer} = \frac{h_{jhar}}{\lambda_{Fed} \cdot S_h} \quad (5.16)$$

Kde:

$h_{jhar}$	Výška jha rotoru	[m]
$S_h$	Povrch styčné plochy mezi rotorovými plechy a hřídelí	[m <sup>2</sup> ]

- **Tepelný odpor hřídele**

$$R_{hřidel} = \frac{l_h}{\lambda_{Fe} \cdot S_h} \quad (5.17)$$

Kde:

$l_h$	Délka hřídele	[m]
$\lambda_{Fe}$	Součinitel tepelné vodivosti železa	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]

- **Tepelný odpor ložiska**

$$R_{ložisko} = \frac{t_l}{\lambda_{Fe} \cdot S_l \cdot 2 \cdot k_l} \quad (5.18)$$

Kde:

$t_l$	Tloušťka ložiska	[m]
$S_l$	Styčná plocha ložiska mezi hřídelí a ložiskem	[m <sup>2</sup> ]
$k_l$	Koeficient upravující součinitel tepelné vodivosti ložiska	[-]

- **Tepelný odpor vnějšího povrchu kostry stroje  $R_{ko}$**

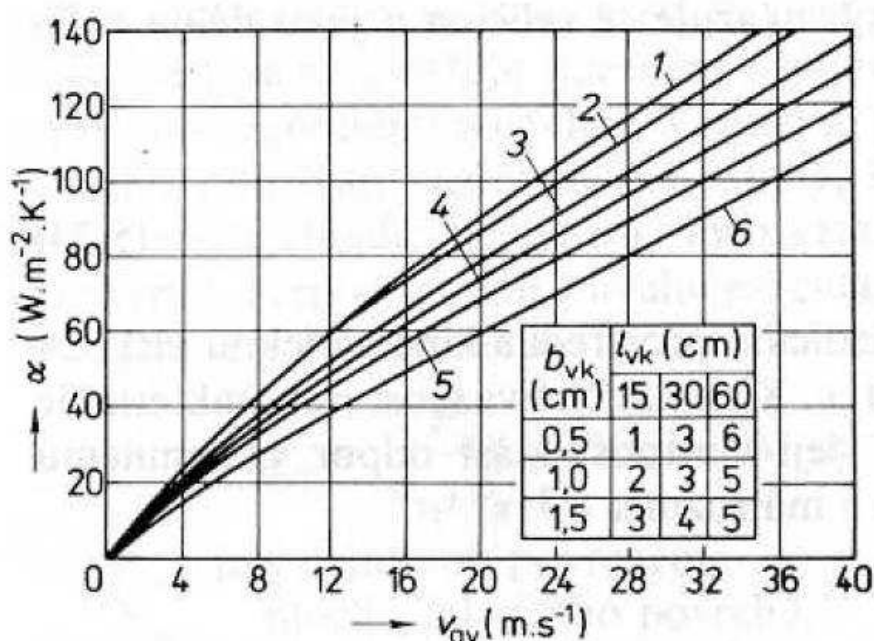
$$R_{ko} = \frac{1}{k_{ze} \cdot \alpha'_k \cdot S'_k + \alpha''_k \cdot S''_k + \alpha'''_k \cdot S'''_k} \quad (5.19)$$

Kde:

$\alpha'_k$	Součinitel přestupu tepla s uvažováním činitele $k_{ze}$	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\alpha''_k$	Součinitel přestupu tepla bočního povrchu ze strany ventilátoru	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\alpha'''_k$	Součinitel přestupu tepla bočního povrchu z neofukované strany	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$S'_k$	Povrch kostry ofukované vzduchem	[m <sup>2</sup> ]

$S_k''$	Povrch boční strany ze strany ventilátoru	[m <sup>2</sup> ]
$S_k'''$	Povrch boční strany, která není ofukována vzduchem	[m <sup>2</sup> ]
$k_{že}$	Činitel respektující zhoršení předávání tepla žebrovaným povrchem z důvodu tepelného záření mezi jednotlivými žebry	[-]

Součinitel  $\alpha_k'$  je volen podle obr. 5.3 s uvažováním činitele ohybu vzduchu  $k_{že}$ . Součinitel  $\alpha_k''$  může být zvolen podle rychlosti vzduchu vytvořeného ventilátorem, nebo jako součinitel  $\alpha_k'''$  z tab. 5.1 pro klidný vzduch.



obr. 5.3: Součinitel přestupu tepla v závislosti na rychlosti vzduchu [1]

tab. 5.1: Součinitele přestupu tepla pro ohřátý povrch, který je v ustáleném stavu [1]

Charakteristika povrchu	$\alpha_0$ [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
Litinový nebo ocelový povrch, tmelený a lakovaný	14,2
Litinový nebo ocelový povrch netmelený, ale lakovaný	16,7
Měděný povrch lakovaný	13,3

tab. 5.2: Součinitele tepelné vodivosti pro různé materiály [1]

Název materiálu	$\lambda$ [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
Měď	380
Hliník	220
Stříbro	420
Železo	80
Ocel elektrotechnická, podél vrstev:	
slabě legovaná	48 až 35
středně legovaná	30 až 26
silně legované	20 až 19
Ocel elektrotechnická:	
napříč vrstev	1,2 až 0,87
s papírovou izolací	4,4 až 3,1
Lakovaná tkanina	0,15
Leteroid	0,23
Elektroizolační lepenka	
suchá	0,18
napuštěná olejem	0,25
Mikanit	0,20
Azbest	0,19
Email, porcelán	1,5 až 1,63
Sklo	1,10
Dřevo napříč vláken	0,11
Vzduch při 0,1 MPa, 40 °C	0,0266
Vodík při 40 °C	0,190
Voda při 40 °C	0,633
Transformátorový olej při 40 °C	0,164
Izolace drážek vinutí rotoru asynchronních strojů:	
třídy A, E	0,10
třídy B, F, H	0,16
Izolace drážek statoru asynchronních strojů:	
třída A, E	0,10
třída B, F, H	0,16

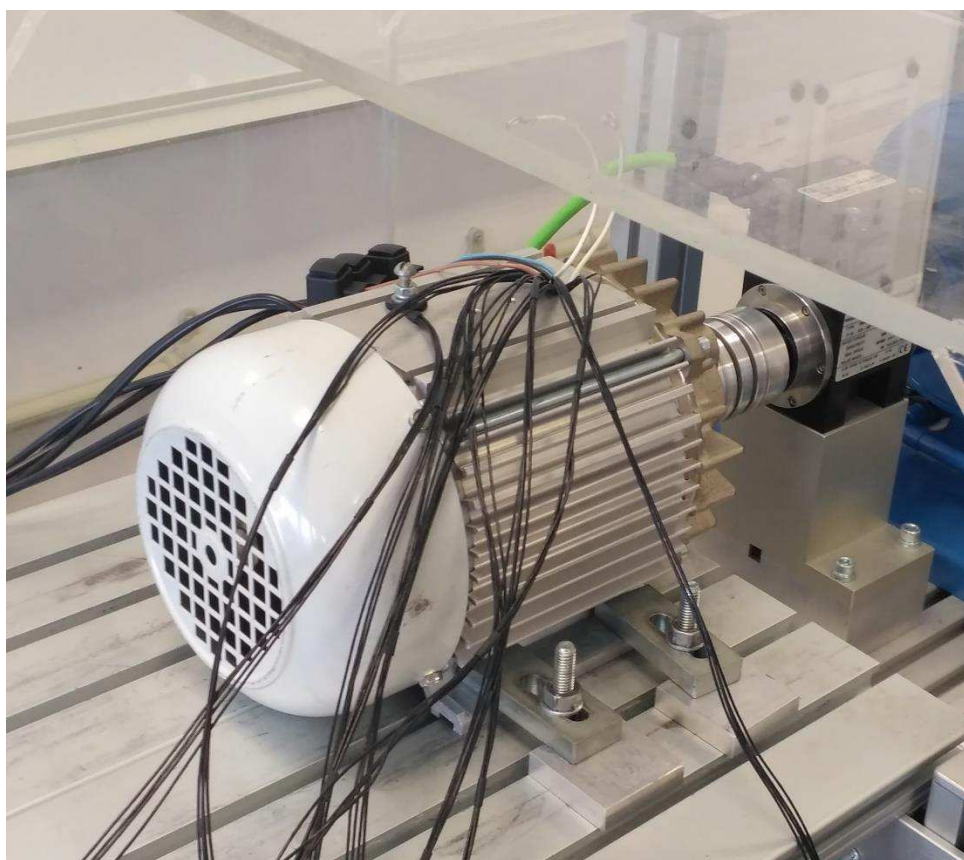
## 6 URČENÍ ZTRÁT MOTORU

### 6.1 Parametry motoru

Jako vzorek byl použit třífázový motor od firmy Atas Náchod. Jeho štítkové údaje jsou v tab. 6.1. Motor má vlastní ventilátor. Proud vzduchu tohoto ventilátoru je usměrňován krytem do žeber stroje. Jedná se o uzavřený stroj, který má pouze vnější ventilaci. Jeho krytí je IP 56.

tab. 6.1: Štítkové údaje motoru

Typ	T22V7512
Počet fází	3
Jmenovitý výkon	0,6 kW
Jmenovité napětí	340-460 V
Jmenovitý statorový proud	1,6 A
Frekvence	50 Hz
Otáčky	2830 ot/min
Účíník	0,83
Stupeň krytí	IP 56

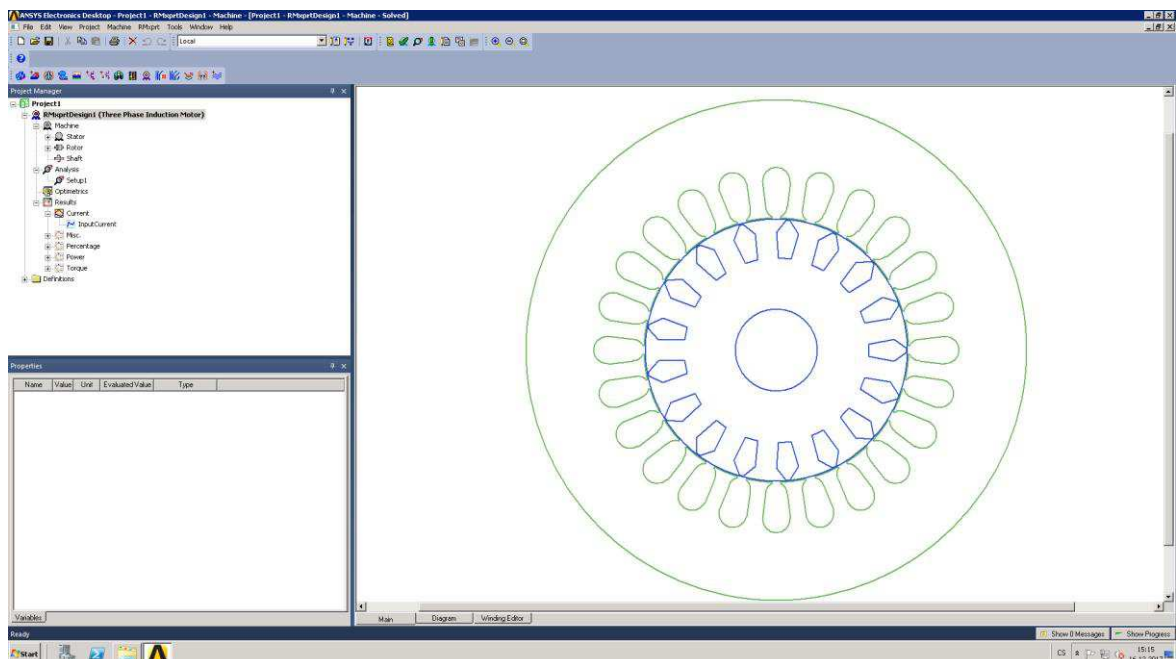


obr. 6.1: Motor Atas s výkonem 600 W

## 6.2 Výpočet ztrát pomocí programu RMxprt

RMxprt je součástí programu Ansys Maxwell, který slouží návrhářům elektrických strojů. Používá se k analytickému výpočtu parametrů točících elektrických strojů. Program dokáže například vypočítat výkon stroje, ztráty motoru, účinnost stroje a další. Program také dokáže vytvořit různé závislosti, jako je například momentová charakteristika [9].

Program umožňuje výpočet bez celkového kreslení motoru. V programu stačí definovat základní rozměrové údaje o statoru a rotoru. Také je potřeba definovat použité materiály. Program zahrnuje knihovny, které obsahují parametry základních materiálů. Do programu je nutné nainportovat magnetizační křivky plechů M700-50A, které jsou použity v rotoru a statoru. Dále program potřebuje pro výpočet základní parametry motoru, jako je výkon, počet pólů, napětí a jeho frekvenci. Tyto veškeré údaje byly získány z technické dokumentace daného stroje s výkonem 600 W. Ukázka prostředí programu je na obr. 6.2.



obr. 6.2: Ukázka programu ANSYS Maxwell RMxprt

Pomocí programu jsou vypočítány ztráty pro zadaný motor 600 W. Výsledné hodnoty jsou v tab. 6.2.

**tab. 6.2: Vypočítané parametry motoru pomocí programu RMxpr**

Vypočítané parametry motoru pomocí programu RMxprt			
Ztráty v železe	$\Delta P_{fe}$	[W]	30,6
Ztráty ve vinutí statoru	$\Delta P_{n1}$	[W]	69,2
Ztráty v drážkách statoru	$\Delta P_{dr}$	[W]	27,1
Ztráty v čelech statoru	$\Delta P_c$	[W]	42,0
Ztráty ve vinutí rotoru	$\Delta P_{n2}$	[W]	35,1
Mechanické ztráty	$\Delta P_m$	[W]	13,1
Dodatečné ztráty	$\Delta P_d$	[W]	6,0
Celkové ztráty	$\Delta P$	[W]	153,9
Vstupní výkon	$P_1$	[W]	754,0
Výstupní výkon	$P_2$	[W]	600,0
Účinnost stroje	$\eta$	[%]	79,6
Otáčky stroje	$n$	[ot/min]	2837,7
Moment stroje	$M$	[Nm]	2,02

## 6.3 Měření ztrát asynchronního motoru

Měření a zpracování dat pro ztráty asynchronního motoru jsou provedeny podle normy ČSN EN 60034-2-1 ed. 2. Je použita metoda 2-1-1B, při které jsou určeny dílčí složky ztrát [2]:

- ztráty v železe,
- ventilační ztráty a ztráty třením,
- ztráty v mědi statoru a rotoru,
- přídatné ztráty při zatížení.

Pro měření je nutné motor nechat spuštěný při jmenovitém zatížení dostatečně dlouhou dobu, aby se ohřál na provozní teplotu. Změna teploty motoru by neměla být větší než 1 K za půl hodiny. Nejprve se tedy změří motor při jmenovitém zatížení, poté se změří křivka zatížení, a nakonec se provede měření naprázdno [2].

### 6.3.1 Měření křivky zatížení

Měření křivky zatížení se musí provést neprodleně po měření motoru při jmenovitém zatížení (motor je zahřátý na provozní teplotu). Motor měříme v šesti zatěžovacích bodech, a to od 125 % do 25 % jmenovitého zatížení. Při měření je nutné dodržet minimální kolísání frekvence napájecího napětí, čehož lze dosáhnout použitím regulovaného třífázového zdroje napětí, který drží pevně nastavené

hodnoty. Při zkoušce je nutné postupovat co nejrychleji, aby se co nejméně změnila teplota motoru. Před začátkem a po konci měření se musí také změřit odpory vinutí, které se měří mezi jednotlivými vinutími statoru [2].

Při tomto měření se zaznamenávají hodnoty zatěžovacího momentu  $M$ , příkonu  $P_1$ , proudy jednotlivými vinutími  $I_1, I_2, I_3$ , sdružená napětí  $U_1, U_2, U_3$  a otáčky motoru  $n$ .

Poté lze vypočítat výstupní výkon motoru [2]:

$$P_2 = M \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \quad [\text{W}] \quad (6.1)$$

Průměrná hodnota odporu mezi fázemi:

$$R = \frac{1}{3}(R_{1-2} + R_{1-3} + R_{2-3}) \quad [\Omega] \quad (6.2)$$

Průměrná hodnota statorového proudu:

$$I = \frac{1}{3}(I_1 + I_2 + I_3) \quad [\text{A}] \quad (6.3)$$

Průměrná hodnota sdruženého napětí:

$$U = \frac{1}{3}(U_1 + U_2 + U_3) \quad [\text{V}] \quad (6.4)$$

Výpočet ztrát v mědi statoru při zatěžování [2]:

$$\Delta P_{n1} = 1,5 \cdot R \cdot I^2 \quad [\text{W}] \quad (6.5)$$

Skluz [2]:

$$s = 1 - \frac{n}{f \cdot 60} \quad [-] \quad (6.6)$$

Ztráty v železe  $\Delta P_{fe}$  se určují z měření naprázdno, postup výpočtu udává norma ČSN EN 60034-2-1 ed. 2.

Ztráty v rotoru se poté vypočítají [2]:

$$\Delta P_{n2} = (P_1 - \Delta P_{n1} - \Delta P_{fe}) \cdot s \quad [\text{W}] \quad (6.7)$$

### 6.3.2 Měření naprázdno

Při měření naprázdno je hřídel stroje mechanicky odpojená od zátěže. Poté stroj odebírá ze sítě pouze výkon na pokrytí ztrát v železe, mechanických ztrát a ztrát ve vinutí statoru, které způsobuje proud naprázdno  $I_0$ .

V normě ČSN EN 60034-2-1 ed. 2 je uveden postup pro provedení této zkoušky, včetně uvedených hodnot napájecího napětí potřebného pro měření. Tato zkouška se provádí hned po měření křivky zatížení. Měření provádíme co nejrychleji nastavováním hodnot napájecího napětí od největšího po nejmenší.

Pro každou hodnotu napájecího napětí zaznamenáváme hodnoty sdružených napětí  $U_{10}$ ,  $U_{20}$ ,  $U_{30}$ , proudy naprázdno v jednotlivých vinutích stroje  $I_{10}$ ,  $I_{20}$ ,  $I_{30}$ , celkový příkon  $P_1$  a účinník  $\cos\varphi$ . Před a po měření je také nutné změřit odpory vinutí [2].

Průměrné hodnoty odporu mezi fázemi, statorového proudu a sdruženého napětí se počítají stejně jako při měření křivky zatížení.

Ztráty v mědi statoru při měření naprázdno [2]:

$$\Delta P_{n10} = 1,5 \cdot R_0 \cdot I_0^2 \quad [\text{W}] \quad (6.8)$$

Konstantní ztráty [2]:

$$\Delta P_c = P_{10} - \Delta P_{n10} \quad [\text{W}] \quad (6.9)$$

Pro ztráty naprázdno při napájecím napětí mezi 60 % a 30 % jmenovitého napětí se vynese závislost konstantních ztrát  $\Delta P_c$  na druhé mocnině napájecího napětí  $U_0^2$ . Při extrapolaci přímky do nulového napětí získáme hodnotu ventilačních ztrát a ztrát třením ( $\Delta P_m$ ).

Pro určení ztrát v železe se vytvoří křivka závislosti  $\Delta P_{fe} = \Delta P_c - \Delta P_m$  na napětí  $U_0$  pro napětí mezi 90 % až 110 % jmenovitého napětí. Pro určení ztrát v železe při jmenovité zátěži je nutné vypočítat vnitřní napětí  $U_i$ . Poté odečtením ztrát v tomto bodě získáme ztráty v železe pro jmenovité zatížení [2].

### 6.3.3 Účinnost motoru

Pro účinnost motoru musí být určeny celkové ztráty, které jsou brány jako součet ztrát v železe, korigovaných ztrát třením a ventilačních ztrát, ztrát při zatížení (korigované ztráty ve statoru a rotoru) a přídavných ztrát při zatížení [2].

Celkové ztráty [2]:

$$\Delta P_T = \Delta P_{fe} + \Delta P_{m\theta} + \Delta P_{n1\theta} + \Delta P_{n2\theta} + \Delta P_{LL} \quad [\text{W}] \quad (6.10)$$



Účinnost se poté vypočítá [2]:

$$\eta = \frac{P_{1\theta} - P_T}{P_{1\theta}} \quad [-] \quad (6.11)$$

### 6.3.4 Výsledky měření

Podle normy je nutné ztráty přepočítat na teplotu chladiva 25 °C pomocí korekčního činitele  $k_\theta$ . Jeho výpočet je uveden v normě ČSN EN 60034-2-1 ed. 2. Přepočítané hodnoty se v tabulkách uvádí s indexem  $\theta$ . Porovnání naměřených ztrát s vypočítanými je v tab. 6.5. Naměřené a vypočítané ztráty se příliš neliší. Největší odchylka je u ztrát ve vinutí statoru  $\Delta P_{n1}$  a u mechanických a ventilačních ztrát  $\Delta P_m$ . Mechanické a ventilační ztráty se však do programu RMxpřt zadávají procentuálně, tudíž je nejsou přímo počítány.

tab. 6.3: Naměřené hodnoty při měření křivky zatížení

$M_n$	<b>M</b>	<b>U</b>	<b>I</b>	<b>P<sub>1</sub></b>	<b>cosφ</b>	<b>n</b>
[%]	[Nm]	[V]	[A]	[W]	[-]	[ot/min]
<b>125</b>	2,507	399,32	1,659	964,1	0,84	2805
<b>115</b>	2,298	399,33	1,555	886,84	0,825	2824
<b>100</b>	1,992	399,34	1,407	774,44	0,796	2851
<b>75</b>	1,496	399,37	1,194	593,12	0,718	2891
<b>50</b>	1,001	399,39	1,02	421,01	0,596	2926
<b>25</b>	0,498	399,41	0,912	252,93	0,401	2963

tab. 6.4: Naměřené a vypočítané hodnoty pro měření naprázdno

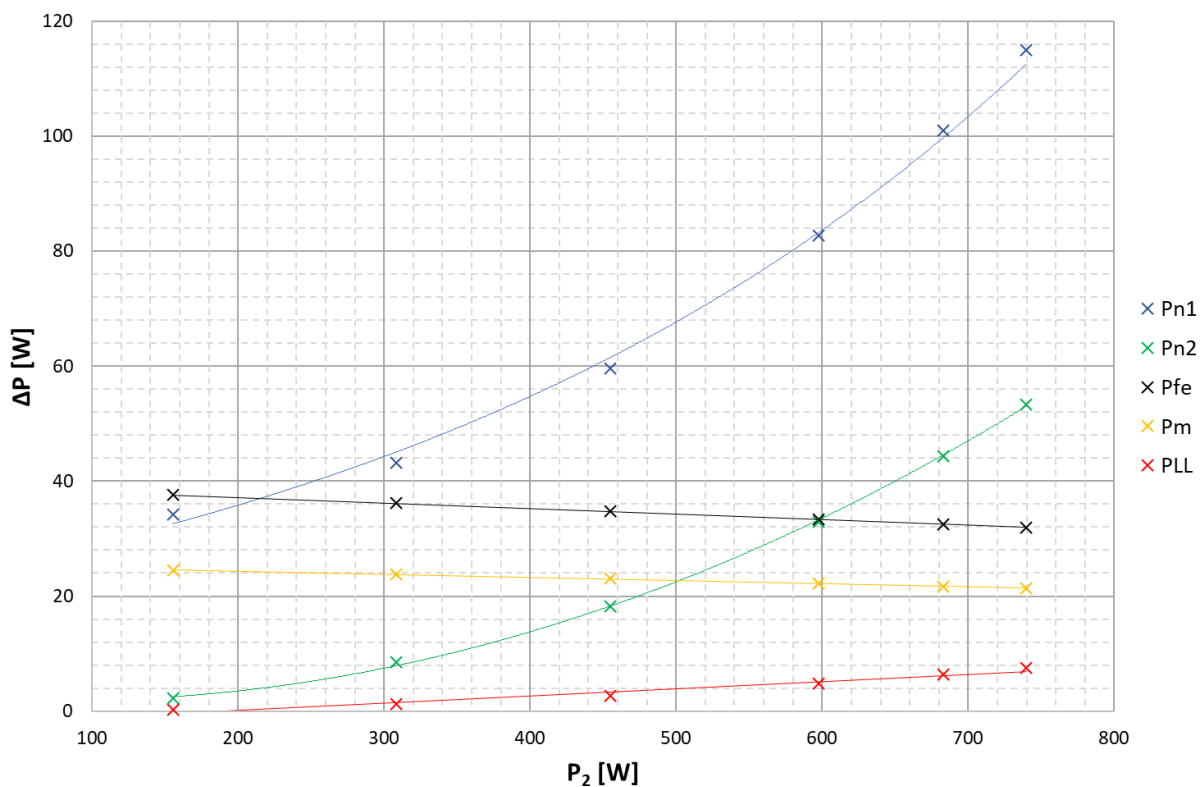
$U_{n0}$	<b>U<sub>0</sub></b>	<b>I<sub>0</sub></b>	<b>P<sub>10</sub></b>	<b>cosφ</b>	<b>ΔP<sub>n10</sub></b>	<b>ΔP<sub>c</sub></b>	<b>ΔP<sub>m</sub></b>	<b>ΔP<sub>fe</sub></b>
[%]	[V]	[A]	[W]	[-]	[W]	[W]	[W]	[W]
<b>110</b>	439,4	1,20	134,06	0,15	56,1	78,0	25,3	52,7
<b>100</b>	399,4	0,86	92,52	0,16	29,0	63,5		38,2
<b>95</b>	379,5	0,76	81,54	0,16	22,5	59,0		33,8
<b>90</b>	359,5	0,69	72,64	0,17	18,3	54,3		29,0
<b>60</b>	239,7	0,38	41,81	0,26	5,7	36,1		10,8
<b>50</b>	199,7	0,32	36,91	0,34	3,9	33,0		7,7
<b>40</b>	159,8	0,26	32,25	0,44	2,7	29,5		4,3
<b>30</b>	119,8	0,24	30,46	0,62	2,2	28,3		3,0

tab. 6.5: Porovnání vypočítaných ztrát pomocí RMxpřt s naměřenými ztrátami

	<b>P<sub>1</sub></b>	<b>P<sub>2</sub></b>	<b>ΔP<sub>fe</sub></b>	<b>ΔP<sub>n1</sub></b>	<b>ΔP<sub>n2</sub></b>	<b>ΔP<sub>m</sub></b>	<b>ΔP<sub>LL</sub></b>	<b>ΔP</b>	<b>η</b>
	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[%]
<b>RMxpřt</b>	754,0	600,0	30,6	69,2	35,1	13,1	6,0	153,9	79,6
<b>Měření</b>	775,0	597,5	33,4	82,7	32,9	22,2	4,8	175,9	77,3

tab. 6.6: Vypočítané ztráty pro různé zatížení motoru

Jmenovitý moment	$M_n$	[%]	125	115	100	75	50	25
Moment	$M$	[Nm]	2,51	2,30	2,00	1,50	1,00	0,50
Korigovaný výkon	$P_{2\theta}$	[W]	739,9	682,8	597,5	455,0	308,2	155,2
Korigovaný skluz	$s_\theta$	[-]	0,07	0,06	0,05	0,04	0,02	0,01
Korigovaný příkon	$P_{1\theta}$	[W]	964,9	887,5	775,0	593,5	421,3	253,1
Ztráty v železe	$\Delta P_{fe}$	[W]	31,9	32,5	33,4	34,8	36,2	37,6
Korigované ztráty třením a ventilační ztráty	$\Delta P_{m\theta}$	[W]	21,3	21,7	22,2	23,0	23,7	24,5
Přídavné ztráty při zatížení	$\Delta P_{LL}$	[W]	7,6	6,3	4,8	2,7	1,2	0,3
Korigované ztráty v rotoru	$\Delta P_{n2\theta}$	[W]	53,4	44,4	32,9	18,2	8,5	2,2
Korigované ztráty ve statoru	$\Delta P_{n1\theta}$	[W]	115,0	101,0	82,7	59,5	43,1	34,2
Účinník	$\cos\varphi$	[W]	0,84	0,83	0,80	0,72	0,60	0,40
Celkové ztráty	$\Delta P_T$	[W]	229,2	206,0	175,9	138,3	112,7	98,8
Účinnost	$\eta$	[%]	76,2	76,8	77,3	76,7	73,2	61,0



obr. 6.3: Závislost jednotlivých ztrát motoru na výstupním výkonu

## 7 URČENÍ TEPLŮT MOTORU

### 7.1 Výpočet metodou tepelných odporů

#### 7.1.1 Výpočet tepelných odporů

tab. 7.1: Vstupní parametry potřebné pro výpočty

Plocha drážek	$S_i = 42246,72 \text{ mm}^2$
Tloušťka izolace v drážce	$b_i = 0,1 \text{ mm}$
Plocha čela vinutí statoru od hřídele	$S_{c11} = 15100,00 \text{ mm}^2$
Plocha čela vinutí statoru od ventilátoru	$S_{c12} = 15100,00 \text{ mm}^2$
Tloušťka izolace vinutí čela statoru od hřídele	$b_c = 0,1 \text{ mm}$
Efektivní průřez vodiče v drážce statoru	$S_{ef} = 0,53 \text{ mm}^2$
Efektivní počet vodičů v drážce statoru	$V_{ef} = 92$
Počet drážek statoru	$Q = 24$
Počet drážek rotoru	$Q_2 = 17$
Průřez tyče rotoru	$S_{al} = 35,13 \text{ mm}^2$
Osová délka statorového svazku	$l_1 = 60 \text{ mm}$
Délka čel statoru	$l_c = 58 \text{ mm}$
Délka čel rotoru	$l_{c2} = 25 \text{ mm}$
Výška jha statoru	$h_{jhas} = 15,8 \text{ mm}$
Výška jha rotoru	$h_{jhar} = 12,275 \text{ mm}$
Vnější povrch paketu	$S_{er} = 22732,56 \text{ mm}^2$
Vnitřní ofukovaný povrch kostry	$S_{vk} = 48988,67 \text{ mm}^2$
Povrch ofukované kostry	$S_{k'} = 132904 \text{ mm}^2$
Povrch kostry ze strany ventilátoru	$S_{k''} = 10028 \text{ mm}^2$
Povrch kostry z neofukované strany	$S_{k'''} = 12034,5 \text{ mm}^2$
Rychlost vzduchu z ventilátoru	$v_{vent} = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Délka hřídele	$l_h = 130,5 \text{ mm}$
Povrch styčné plochy mezi rotorovými plechy a hřídelí	$S_h = 3769,9 \text{ mm}^2$
Povrch rotoru	$S_{\delta} = 11950,62 \text{ mm}^2$
Vzduchová mezera	$\delta = 0,6 \text{ mm}$
Tloušťka ložiska	$t_l = 10 \text{ mm}$
Plocha ložiska	$S_l = 753,98 \text{ mm}^2$
Plocha jednoho čela rotoru	$S_{c2} = 5624,755 \text{ mm}^2$

Údaje v tab. 7.1 byly zjištěny z technické dokumentace daného motoru. Údaje o velikosti ploch byly zjištěny pomocí programu Autodesk Inventor.

Veškeré níže uvedené výpočty vycházejí z teorie uvedené v kapitole 5.2.

- **Tepelný odpor drážkové izolace ve statoru**

$$R_i = \frac{b_i}{\lambda_i \cdot S_i} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{0,16 \cdot 42246,72 \cdot 10^{-6}} = \underline{\underline{14,79405 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}}$$

Součinitel  $\lambda_i$  byl zvolen z tab. 5.2 pro izolaci drážek statoru asynchronních strojů třídy izolace F.

- **Tepelný odpor čel vinutí statoru**

$$R_{c11} = \frac{b_c}{\lambda_c \cdot S_{c11}} + \frac{1}{\alpha_c \cdot S_{c11}} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{0,16 \cdot 151 \cdot 10^{-4}} + \frac{1}{145 \cdot 151 \cdot 10^{-4}} = \underline{\underline{0,49811 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}}$$

$$R_{c12} = \frac{1}{\alpha_c \cdot S_{c12}} = \frac{1}{145 \cdot 15100 \cdot 10^{-6}} = \underline{\underline{0,45673 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}}$$

$$R_c = \frac{R_{c11} \cdot R_{c12}}{R_{c11} + R_{c12}} = \underline{\underline{0,228925 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}}$$

$$\alpha_c = 10 \cdot (1 + 0,54 \cdot v^2) = 10 \cdot (1 + 0,54 \cdot 5^2) = 145 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

- **Tepelný odpor kovu vinutí statoru**

$$R_v = \frac{l_1 + l_c}{12 \cdot Q \cdot V_{ef} \cdot S_{ef} \cdot \lambda_z} = \frac{60 \cdot 10^{-3} + 58 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 24 \cdot 92 \cdot 0,53 \cdot 10^{-6} \cdot 380} = \underline{\underline{0,0221127 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}}$$

$$R_{v11} = R_{v12} = R_v \cdot 2 = \underline{\underline{0,0442254 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}}$$

Vinutí statoru se skládá z měděných vodičů, proto byl součinitel  $\lambda_z$  zvolen z tab. 5.2 pro měď.

- **Tepelný odpor železa statoru**

$$R_{fe} = \frac{1}{S_{er}} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_{jha}} + \frac{1}{\alpha_{\delta j}} \right) = \frac{1}{22732,56 \cdot 10^{-6}} \left( \frac{1}{1772,1519} + \frac{1}{900} \right) = \underline{\underline{0,0737 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}}$$

$$\alpha_{jha} = \frac{\lambda_{Fed}}{h_{jhas}} = \frac{28}{15,8 \cdot 10^{-3}} = 1772,1519 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel  $\lambda_{Fed}$  byl zvolen z tab. 5.2 pro středně legovanou ocel (střední hodnota).

- **Tepelný odpor  $R_{vk}$**

$$R_{vk} = \frac{1}{\alpha \cdot S_{vk}} = \frac{1}{21,71 \cdot 48988,67 \cdot 10^{-6}} = \underline{\underline{0,94025 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}}$$

$$\alpha = \alpha_0 \cdot (1 + k_0 \cdot v_v) = 16,7 \cdot (1 + 0,06 \cdot 5) = 21,71 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla  $\alpha_0$  byl zvolen z tab. 5.1 pro litinový povrch netmelený, ale lakovaný. Činitel  $k_0$  byl zvolen 0,06 (střední hodnota).

- **Tepelný odpor vzduchové mezery mezi rotorem a statorem**

$$R_{\delta} = \frac{1}{\alpha_{\delta} \cdot S_{\delta}} = \frac{1}{944,71 \cdot 11950,62 \cdot 10^{-6}} = \underline{\underline{0,08858 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}}$$

$$\alpha_{\delta} = [Nu] \cdot \frac{\lambda_v}{2 \cdot \delta} = 40,56 \cdot \frac{0,02795}{2 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3}} = 944,71 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$Nu = \frac{0,212 \cdot f \cdot Re}{1 - \frac{3,81}{f \cdot Re}} = \frac{0,212 \cdot 0,03287 \cdot 5702,238}{1 - \frac{3,81}{0,03287 \cdot 5702,238}} = 40,56$$

$$f = \frac{1}{4 \cdot \left[1,11 + 2 \cdot \log\left(\frac{\delta}{e}\right)\right]^2} = \frac{1}{4 \cdot \left[1,11 + 2 \cdot \log\left(\frac{0,6 \cdot 10^{-3}}{0,09 \cdot 10^{-3}}\right)\right]^2} = 0,03287$$

$$Re = \frac{v \cdot S_{\delta}}{\nu} = \frac{9,543 \cdot 11950,62 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-5}} = 5702,238$$

Hodnota tolerance opracování rotoru bývá mezi 0,08 mm až 0,1 mm. Byla zvolena střední hodnota  $e = 0,09$  mm. Obvodová rychlost rotoru je pro jmenovité otáčky 2830 ot/min  $v = 9,543 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Součinitel tepelné vodivosti  $\lambda_v = 0,02795 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  byl zvolen pro teplotu vzduchu 60 °C. Kinematická vazkost vzduchu při teplotě 60 °C je  $\nu' = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  [1].

- **Tepelný odpor čela rotoru**

$$R_{c21} = R_{c22} = \frac{1}{\alpha_c \cdot S_{c2}} = \frac{1}{145 \cdot 5624,755 \cdot 10^{-6}} = \underline{\underline{1,2261 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}}$$

Součinitel přestupu tepla  $\alpha_c$  byl zvolen stejný jako při výpočtu odporu čel vinutí statoru.

- **Tepelný odpor tyčí rotoru**

$$R_{v21} = R_{v22} = \frac{l_1 + l_{c2}}{12 \cdot Q_2 \cdot S_{al} \cdot \lambda_z} = \frac{60 \cdot 10^{-3} + 25 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 17 \cdot 35.13 \cdot 10^{-6} \cdot 220} \cdot 2 = \underline{\underline{0,1078 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}}$$

Tyče rotoru jsou vyrobeny z hliníku, proto byl součinitel  $\lambda_z$  zvolen z tab. 5.2 pro hliník.

- **Tepelný odpor železa rotoru**

$$R_{fer} = \frac{h_{jhar}}{\lambda_{Fed} \cdot S_h} = \frac{12,275 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 3769,9 \cdot 10^{-6}} = \underline{\underline{0,11628 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}}$$

Součinitel  $\lambda_{Fed}$  byl zvolen stejný jako při výpočtu tepelného odporu železa statoru  $R_{fe}$ .

- **Tepelný odpor hřídele**

$$R_{hřidel} = \frac{l_h}{\lambda_{Fe} \cdot S_h} = \frac{130,5 \cdot 10^{-3}}{80 \cdot 3769,9 \cdot 10^{-6}} = \underline{\underline{0,4327 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}}$$

Součinitel  $\lambda_{Fe}$  byl zvolen z tab. 5.2 pro železo.

- **Tepelný odpor ložiska**

$$R_{hřidel} = \frac{t_l}{\lambda_{Fe} \cdot S_l \cdot k_l} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{80 \cdot 753,98 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 0,5} = \underline{\underline{0,16578 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}}$$

Ložisko se skládá z různých částí (nemůžeme ho uvažovat jako čisté železo), a proto musel být do výpočtu zanesen koeficient  $k_l$ , který byl zvolen 0,5.

- **Tepelný odpor vnějšího povrchu kostry stroje**

$$R_{ko} = \frac{1}{k_{ze} \cdot \alpha'_k \cdot S'_k + \alpha''_k \cdot S''_k + \alpha'''_k \cdot S'''_k}$$

$$R_{ko} = \frac{1}{0,95 \cdot 35 \cdot 132904 \cdot 10^{-6} + 16,7 \cdot 10028 \cdot 10^{-6} + 14,2 \cdot 12034,5 \cdot 10^{-6}}$$

$$R_{ko} = \underline{\underline{0,210198 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}}}$$

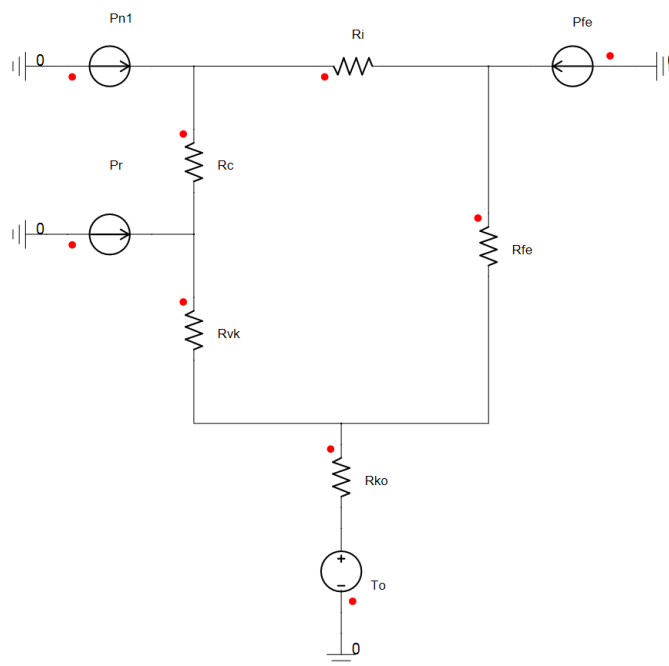
Rychlost vzduchu z ventilátoru je  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , ale při výpočtu je nutné zohlednit ohyb proudu vzduchu (vzduch proudí i mimo žebra). Proto byl zvolen součinitel přestupu tepla  $\alpha_k'$  z obr. 5.3 pro proud vzduchu o rychlosti  $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Součinitelé  $\alpha_k''$  a  $\alpha_k'''$  byly zvoleny z tab. 5.1 pro litinový povrch tmelený a lakovaný, a pro litinový povrch netmelený, ale lakovaný.

## 7.1.2 Program

Výpočet byl vytvořen pomocí programu Matlab. Výpočet je založen na řešení obvodu pomocí metody uzlových napětí MUN. V rámci výpočtu jsou řešeny tři druhy náhradních obvodů. První výpočet je pro obvod znázorněný na obr. 5.1. Druhý výpočet uvažuje zjednodušené schéma, kde je zanedbán odpor kovu vinutí  $R_v$  (obr. 7.1). Nakonec byl vytvořen program pro výpočet rozšířeného tepelného schéma, který je na obr. 5.2.

Teploty jsou počítány pro ztráty určené pomocí RMxpvt a pro ztráty stanovené laboratorním měřením. Jako teplota okolí  $T_o$  byla zvolena teplota  $23,57 \text{ }^\circ\text{C}$ , která odpovídá podmínkám při měření.



obr. 7.1: Zjednodušené náhradní tepelné schéma pro uzavřené stroje s povrchovým chlazením

$$\begin{pmatrix} G_{ko} + G_{fe} + G_{vk} & -G_{vk} & 0 & 0 & -G_{fe} \\ -G_{vk} & G_{vk} + G_c & -G_{vk} & 0 & 0 \\ 0 & -G_{vk} & G_v + G_{vk} & -G_v & 0 \\ 0 & 0 & -G_v & G_i + G_v & -G_i \\ -G_{fe} & 0 & 0 & -G_i & G_i + G_{fe} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathcal{Q}_{10} \\ \mathcal{Q}_{20} \\ \mathcal{Q}_{30} \\ \mathcal{Q}_{40} \\ \mathcal{Q}_{50} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_0 \cdot G_{ko} \\ P_r \\ P_c \\ P_{dr} \\ P_{fe} \end{pmatrix}$$

obr. 7.2: Matice pro výpočet prvního tepelného modelu v programu Matlab (obr. 5.1)

$$\begin{pmatrix} G_{ko} + G_{fe} + G_{vk} & -G_{vk} & 0 & -G_{fe} \\ -G_{vk} & G_{vk} + G_c & -G_{vk} & 0 \\ 0 & -G_{vk} & G_i + G_c & -G_i \\ -G_{fe} & 0 & -G_i & G_i + G_{fe} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathcal{Q}_{10} \\ \mathcal{Q}_{20} \\ \mathcal{Q}_{30} \\ \mathcal{Q}_{40} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_0 \\ P_r \\ P_{n1} \\ P_{fe} \end{pmatrix}$$

obr. 7.3: Matice pro výpočet druhého tepelného modelu v programu Matlab (obr. 7.1)

$$\begin{pmatrix} G_{c11} + G_{v11} & -G_{v11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{c11} & 0 \\ -G_{v11} & G_i + G_{v11} + G_{v12} & -G_{v12} & -G_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -G_{v12} & G_{c12} + G_{v12} & 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{c12} & 0 \\ 0 & -G_i & 0 & G_{fe} + G_i + G_{\delta} & 0 & -G_{\delta} & 0 & 0 & -G_{fe} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{c21} + G_{v21} & -G_{v21} & 0 & -G_{c21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -G_{\delta} & -G_{v21} & G_{v21} + G_{v22} + G_{hridel} \\ & & & & & + G_{lozisko} + G_{fer} + G_{\delta} & -G_{v22} & 0 & -G_{hridel} - G_{lozisko} - G_{fer} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{v22} & G_{c22} + G_{v22} & -G_{c22} & 0 \\ -G_{c11} & 0 & -G_{c12} & 0 & -G_{c21} & 0 & -G_{c22} & G_{vk} + G_{c11} + G_{c12} & -G_{vk} \\ 0 & 0 & 0 & -G_{fe} & 0 & -G_{hridel} - G_{lozisko} - G_{fer} & 0 & + G_{c21} + G_{c22} & G_{fe} + G_{hridel} + G_{lozisko} \\ & & & & & & & & + G_{fer} + G_{ko} + G_{vk} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathcal{Q}_{10} \\ \mathcal{Q}_{20} \\ \mathcal{Q}_{30} \\ \mathcal{Q}_{40} \\ \mathcal{Q}_{50} \\ \mathcal{Q}_{60} \\ \mathcal{Q}_{70} \\ \mathcal{Q}_{80} \\ \mathcal{Q}_{90} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{c11} \\ P_{dr} \\ P_{c12} \\ P_{fe} \\ P_{c21} \\ P_r \\ P_{c22} \\ 0 \\ T_0 \cdot G_{ko} \end{pmatrix}$$

obr. 7.4: Matice pro výpočet rozšířeného tepelného modelu v programu Matlab (obr. 5.2)

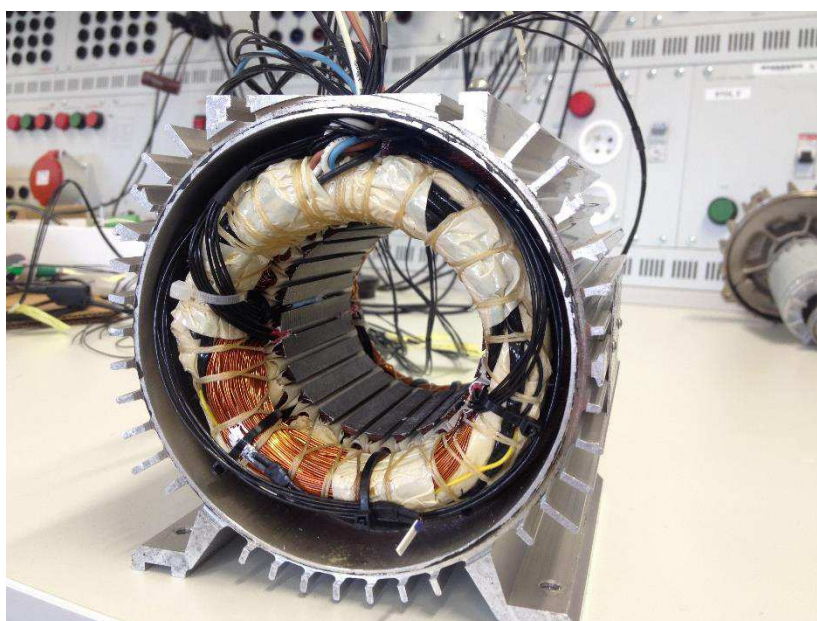
Program řeší obvod pomocí metody uzlových napětí. V maticích jsou místo tepelných odporů jejich vodivosti se stejnými indexy. Výsledkem výpočtu poté jsou teploty v uzlových bodech. Ve zjednodušených modelech jsou zjištěny teploty ve třech bodech motoru. Rozšířený tepelný model umožňuje výpočet teplot v devíti uzlech motoru.

## 7.2 Praktické měření

Pro měření teplot v asynchronním motoru byla použita kontaktní metoda pomocí odporových senzorů. Pro tento účel byly použity platinové snímače Pt 100 a Pt 1000 třídy přesnosti B. Pro lepší kontakt s částmi motoru byla použita teplovodivá pasta. Rozmístění některých snímačů je znázorněno na obr. 7.5. Je nutno zdůraznit, že některé snímače nebyly umístěny přímo na vinutí, ale na izolaci. Výsledky měření teplot jsou spolu s poznámkou o umístění odporového čidla v tab. 7.2. Měření bylo



provedeno po ustálení teplot v motoru, kdy změna teploty byla menší než 1 K za půl hodiny. Motor byl zatěžován jmenovitým momentem 2 Nm.



obr. 7.5: Rozmístění čidel teploty v motoru ze strany hřídele

## 7.3 Výsledky

tab. 7.2: Výsledky měření teplot

Část stroje	Poznámka	ϑ
Chladicí vzduch	-	23,57 °C
Kostra stroje	-	39,43 °C
Kraj drážky od hřídele	Na izolaci	58,07 °C
Střed drážky	Na izolaci	53,65 °C
Čelo vinutí od hřídele	-	70,51 °C
Vinutí v drážce od hřídele	-	62,81 °C
Vnitřní vzduch od hřídele	-	53,78 °C
Kraj drážky od ventilátoru	Na izolaci	52,06 °C
Čelo vinutí od ventilátoru	-	67,04 °C
Vnitřní vzduch od ventilátoru	-	54,40 °C

tab. 7.3: Vypočítané teploty motoru pomocí zjednodušených tepelných modelů

Část stroje	Pro ztráty určené v RMxprt		Pro změřené ztráty	
	Celý model	Zjednodušený	Celý model	Zjednodušený
Vinutí	61,94 °C	62,04 °C	66,05 °C	66,16 °C
Čela vinutí	67,52 °C	66,52 °C	71,09 °C	70,00 °C
Železo statoru	51,92 °C	51,93 °C	54,89 °C	54,89 °C

**tab. 7.4: Vypočítané teploty motoru pomocí rozšířeného tepelného modelu**

Část stroje	Pro ztráty	
	RMxprt	Měření
Čelo statoru od hřídele	61,92 °C	66,11 °C
Čelo statoru od ventilátoru	61,90 °C	66,09 °C
Vinutí statoru	61,11 °C	65,15 °C
Železo statoru	51,93 °C	54,88 °C
Čelo rotoru od hřídele	62,11 °C	65,72 °C
Čelo rotoru od ventilátoru	62,11 °C	65,72 °C
Teplota okolí	23,57 °C	23,57 °C

**tab. 7.5: Porovnání některých naměřených a vypočítaných teplot motoru**

Část stroje	Naměřené	Rozšířený model	Zjednodušený model
Čelo statoru od hřídele	70,51 °C	66,11 °C	71,09 °C
Čelo vinutí od ventilátoru	67,04 °C	66,09 °C	
Vinutí statoru	62,81 °C	65,15 °C	66,05 °C
Teplota okolí	23,57 °C	23,57 °C	23,57 °C

V tab. 7.5 jsou porovnány výsledné teploty motoru, které byly měřeny nebo vypočítány pomocí rozšířeného a zjednodušeného tepelného modelu (pro změřené ztráty). V této tabulce jsou porovnány teploty, které se shodují s polohou čidel teploty (při měření) a s uzli v tepelném modelu. Z technického hlediska nebylo možné umístit čidla na rotor stroje, proto tyto teploty nebyly změřeny. Odchytky naměřených a vypočítaných teplot nejsou větší než 10 °C, což lze považovat při této metodě určování teplot (metoda tepelných odporů) jako dostatečnou přesnost. Tento motor má izolaci vinutí třídy F, u kterých je maximální dovolená teplota 155 °C [10]. Z tohoto hlediska motor vyhovuje, což bylo potvrzeno změřenými i vypočítanými teplotami.

## 8 ZÁVĚR

Tématem bakalářské práce je teplotní analýza malého asynchronního motoru. Pro analýzu byl zvolen motor výrobce Atas s výkonem 600 W, ke kterému byla k dispozici výkresová dokumentace. Cílem práce bylo určit ztráty a následně analyticky určit teploty motoru.

V první části práce jsou vysvětleny možné způsoby sdílení tepla. Dále je popsána konstrukce a funkce asynchronních motorů. Poté jsou rozebrány jednotlivé ztráty v motoru.

V této kapitole jsou znázorněny dva tepelné modely stroje. První model je podle [1] pro uzavřené stroje s povrchovým chlazením. Tento model uvažuje, že veškerý ztrátový výkon proudí přes satorový svazek do kostry stroje. V tomto modelu nejsou zahrnuty tepelné odpory rotoru, což způsobí značné zjednodušení výpočtu. V rámci práce byl také vytvořen zjednodušený model (obr. 7.1), který zanedbává tepelný odpor kovu vinutí. Dále byl vytvořen rozšířený tepelný model (obr. 5.2), který již uvažuje i tepelné odpory rotoru. Tento model také rozděluje stroj na dvě poloviny, což umožňuje výpočet teplot každé strany motoru. Na konci této kapitoly jsou potřebné vztahy pro výpočet tepelných odporů.

V kapitole 6 jsou určeny ztráty motoru, které jsou stanoveny pomocí programu RMxprt a také laboratorním měřením. Potřebné rozměrové a technické údaje pro výpočet ztrát v programu RMxprt byly zjištěny v dokumentaci stroje. Dále byla do programu vložena magnetizační křivka plechu M700-50A, která není v knihovně programu. Výsledné vypočítané údaje z toho programu jsou v tab. 6.2. Laboratorní měření ztrát bylo provedeno podle normy ČSN EN 60034-2-1 ed. 2 metodou 2-1-1B. Porovnání vypočítaných a naměřených ztrát je v tab. 6.5.

Kapitola 7 se zabývá určením teplot v motoru. Na začátku jsou vypočteny všechny tepelné odpory, které jsou obsaženy v tepelných modelech. Výpočet těchto modelů se zakládá na řešení obvodu pomocí metody uzlových napětí. Pro výpočet byl vytvořen program v Matlabu, který se nachází v příloze. Hodnoty teplot byly určeny pro změřené a vypočítané ztráty. Dále byly laboratorně změřeny teploty stroje. V závěru této kapitoly jsou tabulky s naměřenými a vypočítanými teplotami motoru. Jako nejprůkaznější hodnoty z měření můžeme uvažovat ty, jejichž čidlo bylo při měření umístěno pod izolací. Rozdíly naměřených a vypočítaných teplot se pochybují okolo 10 °C, což lze považovat jako dostatečnou přesnost. Z výsledků zjednodušeného a rozšířeného tepelného modelu je patrné, že i při velkém zjednodušení lze dosáhnout dobré přesnosti výsledků.

Výpočet pomocí tepelných modelů znesnadňuje fakt, že je velmi obtížné přesně stanovit velikost jednotlivých odporů, kdy je nutné zahrnout různé tepelné vlivy a vazby ve stroji, což vyžaduje určitou praxi v tomto oboru. Při výpočtech je nutné

počítat s určitým zjednodušením některých vztahů. Ze zmíněných důvodů je nutné vypočítané teploty vyhodnocovat s rezervou.

## Použitá literatura

- [1] KOPYLOV, Igor. *Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [2] ČSN EN 60034-2-1 ed. 2 (350000) *A Točivé elektrické stroje. Část 2-1, Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek (s výjimkou strojů pro trakční vozidla)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>
- [3] KOLÁŘ, Pavel. *Program pro výpočet ventilace a oteplení synchronních strojů*. Brno, 2009, 60 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Rostislav Huzlík.
- [4] HARATEK, Jiří. *Výpočet rozložení teplotního pole v elektrickém stroji*. Brno, 2017, 75 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Marcel Janda, Ph.D.
- [5] MĚŘIČKA, Jiří a Petr VOŽENÍLEK. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1993. ISBN 80-01-01020-1.
- [6] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Elektrické stroje: Skriptum VUT*. 2016.
- [7] PETROV, Georgij. *Elektrické stroje 2*. 1. vyd. Praha: Academia, 1982.
- [8] WIEDEMANN, Eugen a Walter KELLENBERGER. *Konstrukce elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1973.
- [9] Ansys: RMXprt. *Ansys* [online]. b.r. [cit. 2017-12-15]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/products/electronics/ansys-rmxprt>
- [10] Třída izolace vinutí. *EMP Elektromotory a čerpadla* [online]. Slavkov u Brna, b.r. [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.emp-slavkov.cz/faqs/co-znamena-trida-izolace>
- [11] *Typical data for SURA M700-50A* [online]. Cogent power, 2008 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://cogent-power.com/cms-data/downloads/m700-50a.pdf>
- [12] *JSP: Referenční tabulka Pt100* [online]. JSP, 2016 [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <https://www.jsp.cz/files/c0094kpcz.pdf>

## Seznam symbolů, veličin a zkratk

$A$	[m <sup>2</sup> ]	Průřez tepelného toku
$b_c$	[m]	Tloušťka izolace vinutí čel
$b_i$	[m]	Tloušťka izolace drážek
$D$	[m]	Vnější průměr ventilátoru (většinou jako průměr stroje)
$e$	[m]	Tolerance opracování povrchu rotoru
$f$	[-]	Činitel drsnosti povrchu
$grad\theta$	[K·m <sup>-1</sup> ]	Tepelný gradient
$h_{jhas}$	[m]	Výška jha statoru
$h_{jhar}$	[m]	Výška jha rotoru
$I$	[A]	Proud
$I_1$	[A]	Jmenovitý proud vinutím statoru
$I_{1n}$	[A]	Proud vinutím statoru
$k_l$	[-]	Koeficient upravující součinitel tepelné vodivosti ložiska
$k_{že}$	[-]	Činitel respektující zhoršení předávání tepla žebrovaným povrchem, z důvodu tepelného záření mezi jednotlivými žebry
$l$	[m]	Délka tělesa
$l_h$	[m]	Délka hřídele
$l_1$	[m]	Osová délka statorového svazku
$l_c$	[m]	Délka čel
$l_{c2}$	[m]	Délka čel rotoru
$m$	[-]	Počet fází
$n$	[-]	Počet ventilačních lopatek
$Nu$	[-]	Nusseltovo číslo
$p$	[W]	Tepelný tok
$P_1$	[W]	Příkon motoru
$P_{12}$	[W]	Teplený tok mezi dvěma body
$P_2$	[W]	Výkon na hřídeli stroje
$P_c$	[W]	Ztrátový výkon v čelech
$P_{dr}$	[W]	Ztrátový výkon v drážkách statoru
$P_{fe}$	[W]	Ztrátový výkon v železe statoru
$P_{mech}$	[W]	Mechanický výkon
$P_r$	[W]	Ztrátový výkon rotoru
$P_\delta$	[W]	Výkon přenesený přes vzduchovou mezeru
$Q$	[-]	Počet drážek statoru
$R_{12}$	[K·W <sup>-1</sup> ]	Tepelný odpor mezi dvěma body

$R_c$	[K·W <sup>-1</sup> ]	Tepelný odpor čel statorového vinutí
$R_{fe}$	[K·W <sup>-1</sup> ]	Tepelný odpor železa statoru
$R_{fer}$	[K·W <sup>-1</sup> ]	Tepelný odpor železa rotoru
$R_i$	[K·W <sup>-1</sup> ]	Tepelný odpor drážkové izolace
$R_{jha}$	[K·W <sup>-1</sup> ]	Tepelný odpor jha statoru
$R_{ko}$	[K·W <sup>-1</sup> ]	Tepelný odpor vnějšího povrchu kostry
$R_v$	[K·W <sup>-1</sup> ]	Tepelný odpor kovu vinutí
$R_{vk}$	[K·W <sup>-1</sup> ]	Tepelný odpor charakterizující tepelný spád mezi vnitřním ohřátým vzduchem a kostrou stroje
$R_\delta$	[K·W <sup>-1</sup> ]	Tepelný odpor vzduchové mezery mezi rotorem a statorem
$R_{\delta j}$	[K·W <sup>-1</sup> ]	Tepelný odpor technologické mezery statoru
$R_\vartheta$	[Ω]	Elektrický odpor vinutí přepočítaný na danou teplotu
$S$	[m <sup>2</sup> ]	Povrch tělesa
$S''''_k$	[m <sup>2</sup> ]	Povrch boční strany, která není ofukována vzduchem
$S''_k$	[m <sup>2</sup> ]	Povrch boční strany ze strany ventilátoru
$S'_k$	[m <sup>2</sup> ]	Povrch kostry ofukované vzduchem
$S_{al}$	[m <sup>2</sup> ]	Průřez tyče rotoru
$S_c$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha čel
$S_{c2}$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha čela rotoru
$S_{ef}$	[m <sup>2</sup> ]	Efektivní průřez vodiče v drážce statoru
$S_{er}$	[m <sup>2</sup> ]	Vnější povrch paketů
$S_h$	[m <sup>2</sup> ]	Povrch styčné plochy mezi rotorovými plechy a hřídelí
$S_i$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha izolace
$S_l$	[m <sup>2</sup> ]	Styčná plocha mezi ložiskem a hřídelí
$S_{vk}$	[m <sup>2</sup> ]	Vnitřní povrch kostry, který je ofukován vzduchem
$S_\delta$	[m <sup>2</sup> ]	Povrch rotoru
$T_1$	[K]	Teplota povrchu
$T_2$	[K]	Teplota okolí
$t_l$	[m]	Tloušťka ložiska
$v'$	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	Kinematická vazkost vzduchu
$V_{ef}$	[-]	Počet vodičů v drážce statoru
$v_v$	[m·s <sup>-1</sup> ]	Rychlost vzduchu
$\alpha$	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Součinitel přestupu tepla přes povrch
$\alpha$	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Součinitel přestupu tepla
$\alpha''''_k$	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Součinitel přestupu tepla bočního povrchu z neofukované strany
$\alpha''_k$	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Součinitel přestupu tepla bočního povrchu ze strany ventilátoru

$\alpha'_k$	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Součinitel přestupu tepla s uvažováním činitele $k_{že}$
$\alpha_0$	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Součinitel přestupu tepla pro uhřátý povrch v ustáleném stavu
$\alpha_{\delta j}$	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Činitel pro výpočet tepelného odporu mezery mezi státorem a kostrou stroje
$\delta$	[m]	Vzduchová mezera mezi rotorem a státorem
$\Delta P_d$	[W]	Dodatečné ztráty motoru
$\Delta P_{fe}$	[W]	Ztráty v železe statoru
$\Delta P_m$	[W]	Mechanické ztráty (ventilátor, ložiska)
$\Delta P_{n1}$	[W]	Joulové ztráty ve vinutí statoru
$\Delta P_{n2}$	[W]	Joulové ztráty ve vinutí rotoru
$\Delta P_{nd}$	[W]	Dodatečné ztráty při jmenovitém zatížení
$\Delta \vartheta$	[°C]	Rozdíl teplot v tělese
$\varepsilon$	[-]	Emisivita
$\vartheta$	[°C]	Teplota ochlazovaného povrchu
$\vartheta_v$	[°C]	Teplota chladicího média
$\lambda$	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Součinitel tepelné vodivosti
$\lambda_c$	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Součinitel tepelné vodivosti izolace vinutí čel
$\lambda_{fe}$	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Součinitel tepelné vodivosti železa
$\lambda_{Fed}$	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Součinitel tepelné vodivosti plechu v podélném směru
$\lambda_i$	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Součinitel tepelné vodivosti izolace
$\lambda_v$	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Součinitel tepelné vodivosti pro vzduch
$\lambda_z$	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Součinitel tepelné vodivosti kovu vinutí
$\sigma$	[W·K <sup>-4</sup> ·m <sup>-2</sup> ]	Stefan-Boltzmannova konstanta



# Přílohy

Příloha 1: Programy v matlabu

Příloha 2: Měřící pracoviště



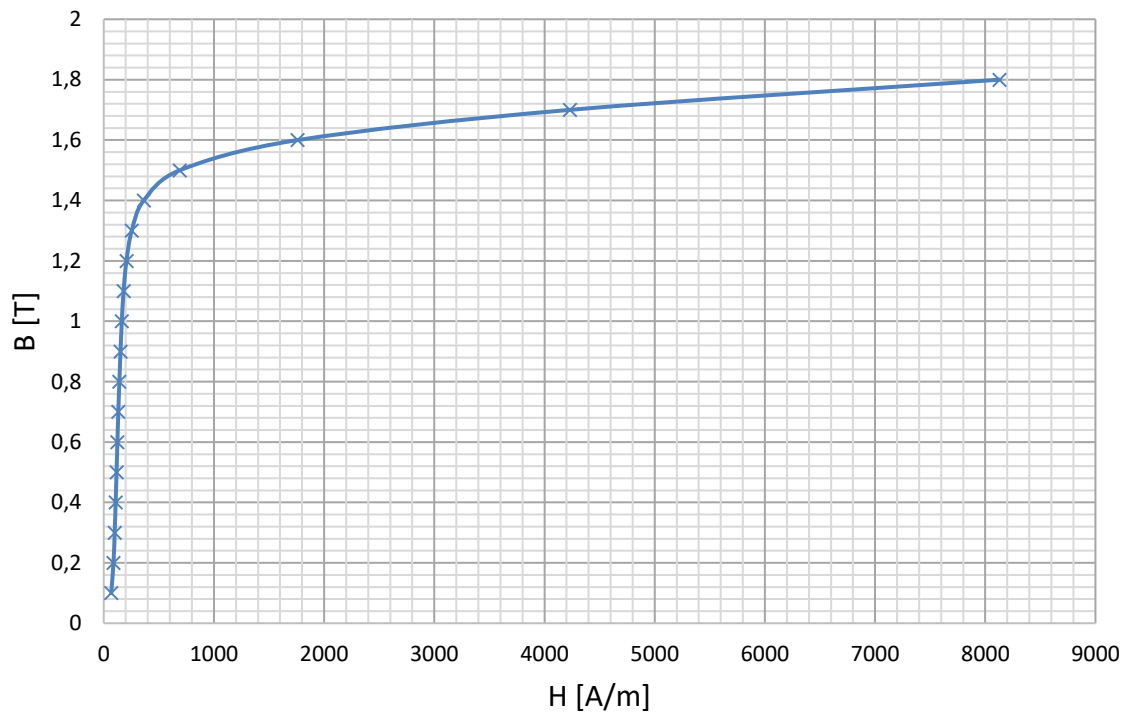
P. obr. 1: Měřící pracoviště

Příloha 3: Štítek motoru



P. obr. 2: Štítek motoru

#### Příloha 4: Magnetizační křivka plechu M700-50A



P. obr. 3: Magnetizační křivka plechu M700-50A [11]

