



# 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

## VÝPOČET ROZLOŽENÍ TEPLOTNÍHO POLE V ELEKTRICKÉM STROJI

CALCULATING THE TEMPERATURE FIELD DISTRIBUTION IN AN ELECTRICAL  
MACHINE

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Čermák

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Bc. Jan Čermák

**ID:** 173631

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2018/19

**NÁZEV TÉMATU:**

## Výpočet rozložení teplotního pole v elektrickém stroji

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Nastudujte problematiku termiky elektrických strojů
2. Vytvořte model elektrického stroje
3. Proveďte výpočty oteplení tohoto stroje pomocí MKP a porovnejte s měřeními

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] STŘEDA, Ivo. Termodynamika: Celost. vysokošk. učebnice. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1991, 149 s. ISBN 80-010-0452-X.

[2] CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů: Celost. vysokošk. učebnice. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958, 714, [1] s.

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 22.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Marcel Janda, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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**

Cílem této práce bylo vytvořit 3D model asynchronního motoru na kterém, bude možno provádět teplotní, i jiné simulace ve výpočetním programu Ansys Workbench.

Následně asynchronní motor reálně změřit a porovnat s výstupními hodnotami získané za pomoci výpočetní techniky.

Celá práce obsahuje teorii oteplování elektrických strojů, dále samostatnou konstrukci 3D modelu, jeho teplotní a CFX analýzu a konečnou analýzu oteplení motoru s chlazením.

## **Klíčová slova**

Elektrické stroje, Metoda konečných prvků, Solidworks, Ansys Workbench, Oteplení

## **Abstract**

The aim of this work was to create a 3D model of an asynchronous motor on which it is possible to perform temperature and other simulations using the Ansys Workbench computational software.

Furthermore, it is possible to measure and compare the asynchronous motor with the output values obtained using computer technology.

The whole work consists of the theory of warming of electric machines, the separate construction of a 3D model, its temperature analysis and the final analysis of engine warming with cooling.

## **Keywords**

Electric machina, Finite Element Method, Solidworks, Ansys Workbench, Warming up

### **Bibliografická citace:**

ČERMÁK, Jan. Výpočet rozložení teplotního pole v elektrickém stroji. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/115975>. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Marcel Janda.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Výpočet rozložení teplotního pole v elektrickém stroji jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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: **21. 5. 2019**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Marcelu Jandovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **21. 5. 2019**

.....

podpis autora

# Obsah

1	Úvod.....	1
2	Termika elektrických strojů .....	2
2.1	Zákony termodynamiky .....	2
2.2	Teplo .....	3
2.3	Teplota.....	3
2.4	Šíření tepla .....	4
2.4.1	Vedení.....	4
2.4.2	Proudění .....	5
2.4.3	Záření/sálání.....	5
3	Chlazení elektrických strojů.....	6
3.1	Ventilátory.....	7
4	Asynchronní elektrický stroj .....	9
5	konstrukce asynchronního stroje.....	10
6	Ztráty v asynchronním stroji .....	13
7	Měření teploty asynchronního motoru .....	17
7.1	Kontaktní metoda .....	17
7.1.1	Termoelektrické senzory.....	17
7.2	Bezkontaktní metoda.....	18
8	Modelování oteplení elektrického stroje .....	19
8.1	Modelování .....	19
8.2	Výpočetní program Ansys Workbench .....	19
8.3	Metoda konečných prvků .....	20
9	Použitý typ elektrického stroje.....	21
9.1	Parametry .....	21
10	Praktická část .....	22
10.1	Ustálená teplotní analýza.....	22
10.1.1	Příprava modelu.....	22
10.1.2	Nastavení výpočtu.....	23
10.1.3	Výsledky ustálené teplotní analýzy .....	25
10.2	Výpočet oteplovací křivky .....	26
10.2.1	Výsledky .....	26

10.3	Proudění vzduchu v okolí ventilátoru CFX Analýza .....	29
10.3.1	Nastavení výpočtu.....	29
10.3.2	Výsledky CFX analýzy .....	31
10.4	Proudění vzduchu v okolí motoru CFX Analýza .....	33
10.4.1	Výsledky CFX analýzy .....	35
10.5	Proudění vzduchu v okolí motoru od ventilátoru CFX Analýza.....	36
10.5.1	Nastavení výpočtu.....	36
10.5.2	Výsledky pro proudění od ventilátoru .....	37
10.6	Chlazení motoru, teplotní a CFX analýza .....	39
10.6.1	Nastavení výpočtu.....	39
10.6.2	Výsledky chlazení motoru .....	40
10.7	Měření teploty asynchronního motoru .....	41
10.7.1	Nezatížený asynchronní motor .....	41
10.7.2	Zatížený asynchronní motor .....	43
11	Závěr .....	45



## Seznam obrázků

3-1: Radiální ventilátor .....	8
3-2: Axiální ventilátor.....	8
Obr. 5-1: Řez asynchronním motorem .....	12
Obr. 5-2: Zapojení motoru Y nebo $\Delta$ .....	12
Obr. 6-1: Zobrazení ztrát asynchronního motoru [11].....	16
Obr. 7-1: Princip Seebeckova jevu [22].....	18
Obr. 8-1: Příklad možných tvarů prvků sítě [13].....	20
Obr. 10-1: Sestava motoru pro teplotní analýzu .....	23
Obr. 10-2: Model po vytvoření sítě pomocí funkce Mesh.....	24
Obr. 10-3: Zobrazení rozložení teploty v ustáleném stavu boční pohled .....	25
Obr. 10-4: Zobrazení rozložení teploty v ustáleném stavu přední pohled .....	25
Obr. 10-5: Zobrazení rozložení teploty v ustáleném stavu, boční pohled pouze motor .....	26
Obr. 10-6: Oteplovací charakteristika asynchronního motoru.....	27
Obr. 10-7: Zobrazení rozložení teploty boční pohled.....	27
Obr. 10-8: Zobrazení rozložení teploty přední pohled .....	28
Obr. 10-9: Zobrazení rozložení teploty, boční pohled pouze motor.....	28
Obr. 10-10: Model ventilátoru .....	29
Obr. 10-11: Nastavení parametrů pro výpočet, ventilátor .....	30
Obr. 10-12: Zobrazení proudnic pro otáčky $n = 1\,400$ ot/min.....	31
Obr. 10-13 : Proudnice pro $n = 1\,400$ ot/min na řezné rovině.....	32
Obr. 10-14: Závislost rychlosti vzduchu na velikosti otáček ventilátoru .....	32
Obr. 10-15: Závislost tlaku vzduchu na velikosti otáček.....	33
Obr. 10-16: Model motoru se vzduchovým obalem .....	34
Obr. 10-17: Zobrazení proudění vzduchu v okolí motoru s počáteční rychlostí 5,5 m/s.....	35
Obr. 10-18: Zobrazení proudění vzduchu na řezné rovině .....	35
Obr. 10-19: Zobrazení rychlosti proudění vzduchu na řezné rovině, boční pohled .	37
Obr. 10-20: Zobrazení rychlosti proudění vzduchu na řezné rovině, přední pohled	37
Obr. 10-21: Zobrazení proudění vzduchu pomocí proudnic boční pohled.....	38

Obr. 10-22: Zobrazení proudění vzduchu pomocí proudnic přední pohled.....	38
Obr. 10-23: Zobrazení rozložení teploty motoru na řezné rovině boční pohled.....	40
Obr. 10-24: Zobrazení rozložení teploty motoru na řezné rovině přední pohled .....	40
Obr. 10-25: Zobrazení rozložení teploty motoru boční pohled .....	41
Obr. 10-26: Měřicí body na motoru.....	42
Obr. 10-27: Změřená oteplovací charakteristika nezatíženého motoru .....	42
Obr. 10-28: Měřicí body pro zatížený motor .....	43
Obr. 10-29: Změřená oteplovací charakteristika zatíženého motoru diferenciálním teploměrem .....	44
Obr. 10-30: Změřená oteplovací charakteristika zatíženého motoru pyrometrem ...	44

## Seznam tabulek

Tab. 2-1: Tabulka převodu mezi teplotními stupnicemi [9] .....	4
Tab. 7-1: Typový štítek motoru s jeho parametry.....	21

# 1 ÚVOD

V točivých elektrických strojích dochází k nechtěnému vzniku tepla a jeho následnému šíření.

Příčin vzniku tepla v elektrických strojích je mnoho. Tyto příčiny je nutno analyzovat a následně vznikající teplo udržet pod určitou hranicí. Pokud by teplota stroje přesáhla určitou hranici, mohlo by dojít k poškození stroje nebo k jeho úplnému zničení.

Z tohoto důvodu se zkoumají možnosti chlazení již v prvních fázích vývoje nového stroje. To napomáhá předejít zničení prototypu stroje při prvotních zátěžových zkouškách, předchází se tak finančním ztrátám způsobeným špatným návrhem a následným opakovaným vývojem.

Tato práce se bude zabývat zkoumáním chlazení elektrického stroje za pomoci výpočetních a grafických programů.

Pro vytvoření modelu potřebného pro výpočty byl zvolen program Solidworks, jelikož se s programem snadno pracuje a poskytuje vysokou kvalitu 3D modelů pro potřebné výpočty.

Druhým programem zvoleným pro následné výpočty byl program ANSYS Workbench, jenž používá metodu konečných prvků a poskytuje mnoho možností výpočtů a poskytuje vysoce kvalitní výsledky.

Motor byl reálně měřen v režimu naprázdno a při zatížení za pomoci teplotního čidla a termokamery. Získané hodnoty byly následně porovnávány se simulacemi a zhodnoceny v závěru.

## 2 TERMIKA ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Při provozu elektrického stroje dochází k jeho zahřívání. Toto se děje na základě přeměny části elektrické energie v důsledku ztrát na energii tepelnou. Tato přeměna vychází ze základních zákonů termodynamiky.

Tato tepelná energie ohřívá části elektrického stroje, jako jsou například: izolace vinutí, ložiska, samotné vinutí, a další.

Působení vyšší teploty než je provozní, maximálně dovolené, na náchylné části stroje, může způsobit brzké opotřebení, které zapříčiní nutnou výměnu dílu (ložiska, nutnost převinutí vinutí), nebo dokonce zničení celého stroje v důsledku vysokých teplot.

Všechny tyto principy vycházejí ze základů termodynamiky. [6],[10]

### 2.1 Zákony termodynamiky

#### **Nultý zákon termodynamiky**

Systémy jsou v termodynamické rovnováze, pokud mají všechny systémy stejnou teplotu.

#### **První zákon termodynamiky**

Zákon zachování energie. Vnitřní energie ( $U$ ) izolovaného systému je konstantní. Změna vnitřní energie ( $dU$ ) je součtem tepla, které bylo dodáno do systému ( $dQ$ ) a práce ( $W$ ), která byla na systému vykonána ( $dW$ )

Změnu vnitřní energie můžeme zapsat jako:

$$dU = dQ - dW \tag{2.1}$$

#### **Druhý zákon termodynamiky**

Tento zákon je postaven na definici entropie, ta definuje stav systému. Celková změna entropie v uzavřeném systému je součtem změny entropie uvnitř systému a entropie, která je do systému přenesena z jeho okolí.

Entropie přenášená do systému ( $dS$ ) je definována, jako podíl dodaného tepla ( $dQ$ ) a teploty ( $T$ ).

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (2.2)$$

Při nevratném ději roste entropie systému. Při vratném ději entropie zůstává stálá. V uzavřeném systému entropie neklesá.

### Třetí zákon termodynamiky

Jestliže teplota ideálního krystalu se blíží 0, blíží se 0 i jeho entropie.[6],[10]

## 2.2 Teplo

Teplo vyjadřuje energii přenesenou mezi dvěma tělesy, nebo mezi tělesem a jeho okolím. Vyjadřuje změnu vnitřní energie tělesa při tepelné výměně.

Odvíjí se od hmotnosti, rozdílu teplot a druhu látky. Může nabývat dvou stavů, kladného i záporného, a to podle děje. V případě, že byla energie dodávána do tělesa, je teplo kladné, pokud byla energie z tělesa odebírána, dosahuje záporné hodnoty.[7],[8],[10]

Značka:	Q	
Jednotka:	J [Joule]	
Vzorec:	$Q = m.c.(T - T_0)$	(2.3)

Kde:

c	...	Měrná tepelná kapacita	$[J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}]$
m	...	Hmotnost	[kg]
T	...	Počáteční teplota	[K]
T <sub>0</sub>	...	Koncová teplota	[K]

## 2.3 Teplota

Teplota je jednou ze základních jednotek SI soustavy, vyjadřuje vnitřní stav energie tělesa. To znamená, že se zvýšení nebo snížení vnitřní energie tělesa projeví zvýšením

nebo snížením teploty tělesa. Při vyšší teplotě se částice pohybují rychleji, tedy mají vyšší energii. Při nižší teplotě se částice pohybují pomaleji, tedy mají nižší energii.

Pro měření teploty se používají různé typy teploměrů, avšak teplota se dá měřit i dalšími způsoby.[7],[8],[10]

Značka: T

Jednotka: K [Kelvin]

Nejnižší možnou teplotou, je tzv. absolutní nula 0K.

Kromě základní stupnice pro měření teploty (Kelvinovy), se mohou používat i další stupnice:“. Jejich výčet je uveden v Tab. 2-1.

**Tab. 2-1: Tabulka převodu mezi teplotními stupnicemi [9]**

Jednotka	Zkr.	Výpočet
Kelvin	K	$=T(K)$
Stupeň Celsia	$^{\circ}C$	$T(C)=T(K) - 273,15$
Delisleho stupeň	$^{\circ}DE$	$T(DE)=1,5.(373,15-T(K))$
Stupeň Fahrenheita	$^{\circ}F$	$T(F)=1,8.(T(K)-273,15)+32$
Newtonův stupeň	$^{\circ}N$	$T(N)=33/100.(T(K)-273,15)$
Rankinův stupeň	$^{\circ}R$	$T(Ra)=1,8.T(K)$
Réaumurův stupeň	$^{\circ}R$	$T(Re)=0,8.(T(K)-273,15)$
Rømerův stupeň	$^{\circ}R\emptyset$	$T(R\emptyset)=21/40.(T(K)-273,15)+7,5$

## 2.4 Šíření tepla

Je to děj, při kterém dochází k přenosu energie z jednoho tělesa na druhé, pokud mají dvě tělesa v nějaké vazbě vůči sobě rozdílné teploty.

Tento děj se uskutečňuje všude kolem nás a probíhá více způsoby. Každý způsob je jedinečný a má svá specifika. Rozlišujeme tři základní způsoby, jež se v praxi většinou objevují současně, jedná se o vedení, proudění a záření. [10]

### 2.4.1 Vedení

Přenos tepla vedením lze chápat jako přenos tepelné energie na úrovni atomů. Atomy na teplejší části tělesa mají větší energii a kmitají rychleji než atomy na studené části tělesa. Tyto atomy si předávají energii formou srážek a dochází k rozkmitání sousedních atomů. Takto předávaná energie se šíří po celém tělese a v celém objemu ve směru od teplejší části ke chladnější. Po předání energie potřebné k vyrovnání teplot

v homogenním tělese, se zahřeje těleso v celém svém objemu na stejnou teplotu a nastává teplotní rovnovážnost. Rychlost vedení teploty, tedy stav tepelné rovnováhy, záleží na tepelné vodivosti tělesa.[10]

## 2.4.2 Proudění

Proces proudění se vyskytuje u kapalin nebo plynů. Kapalina nebo plyn se dostanou do kontaktu s tělesem, které má vyšší teplotu, než samotná kapalina nebo plyn. Při tomto kontaktu nastává tepelná výměna mezi teplejším tělesem a chladnější kapalinou nebo plynem. Ve většině případů nastává u kapaliny, ale i plynu, tepelná roztažnost, tedy vlivem teploty kapalina nebo plyn zvětšuje svůj objem a zmenšuje svoji hustotu. Proudění rozdělujeme na přirozené a nucené. Při přirozeném proudění proudí kapalina nebo plyn samovolně kolem pevného tělesa, jako je tomu například u vzduchu a radiátoru. Naopak při nuceném proudění je kapalina nebo plyn uváděna do pohybu externím zdrojem, typickým příkladem nuceného proudění je ventilátor. [10]

## 2.4.3 Záření/sálání

Tento proces označuje přenos energie pomocí elektromagnetického záření. Každé těleso vyzařuje elektromagnetické záření na určité vlnové délce a s určitou intenzitou. Pokud těleso přijme elektromagnetické záření z jiného tělesa, může svou teplotu zvýšit, pokud bylo přijaté záření výkonnější než záření, které vyzařuje samotné těleso, nebo svou teplotu snížit, pokud je vlastní záření tělesa výkonnější než záření přijaté. Výkon ( $Pr$ ) tohoto záření se odvíjí od povrchu tělesa ( $S$ ) a teplotě ( $T$ ). Tento přenos popisuje Stefan-Boltzmanův zákon.[10]

**Znění zákona:**

$$Pr = \sigma \varepsilon S T^4 \quad [W] \quad (2.4)$$

Kde:

$\sigma$	...	Stefan-Boltzmanova konstanta ( $5,670310^{-8}$ )	
			$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$
$T$	...	Teplota	$[K]$
$\varepsilon$	...	Emisivita (0-1)	$[-]$
$S$	...	Plocha tělesa	$[m^2]$



### 3 CHLAZENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ

V prvopočátcích výroby elektrických strojů se samotnému chlazení nepřikládal velký význam, stroje byly navrhovány předdimenzované a chlazení nebylo nutno řešit. S vývojem elektrických strojů, používání kvalitnějších materiálů a zmenšování elektrických strojů na minimální velikost potřebnou pro požadovaný výkon se začalo chlazení přikládat stále větší význam při navrhování.

Začalo se, řešit možnost odvodu ztrátového tepla v místě jeho vzniku z důvodu snížení provozní teploty pod nebezpečnou hranici. Snížení oteplení stroje při zachování jeho velikosti a bez nutnosti přidávání materiálů pro větší odvod tepla při požadovaném výkonu. S nutností řešit chlazení elektrické stroje, konstruktéři přihlížejí při navrhování vnější části elektrického stroje na následné proudění chladícího média těmito částmi.

Chlazení elektrického stroje se rozděluje podle více kritérií, například podle zdroje, nebo použitého chladícího média. [19],[20]

#### Dělení podle zdroje:

- Přirozené chlazení - toto chlazení probíhá samovolným prouděním chladícího média bez vnějších vlivů.
- Nucené chlazení – toto chlazení je realizováno dalším zařízením, které vytváří nucenou cirkulaci chladícího média. Většinou se jedná o ventilátor.
  - Dělí se na vlastní a cizí:
    - **Vlastní** – ventilátor je umístěn na hřídeli a je poháněn samostatným elektrickým strojem
    - **Cizí** – ventilátor je poháněn vlastním zdrojem, který je s chlazeným elektrickým strojem spojen za pomoci vzduchovodu. Tento způsob se používá velmi zřídka, především u strojů s proměnnými a nízkými otáčkami, u kterých by nebyly zajištěny dostatečné otáčky ventilátoru potřebné pro samotné chlazení. [19],[20]

#### **Dělení podle chladícího média:**

- Vzduch – nejčastěji používané
- Voda, olej – používané pro vysoké výkony
- Vodík – používané pro speciální účely [19],[20]

### **3.1 Ventilátory**

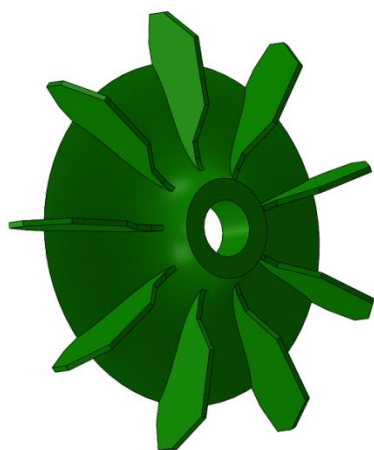
Ventilátory jsou použity jako zdroj tlaku potřebného pro vytvoření nuceného proudění média a následného chlazení elektrického stroje.

Pro chlazení se používají především dva typy ventilátorů podle směru proudění. [18]

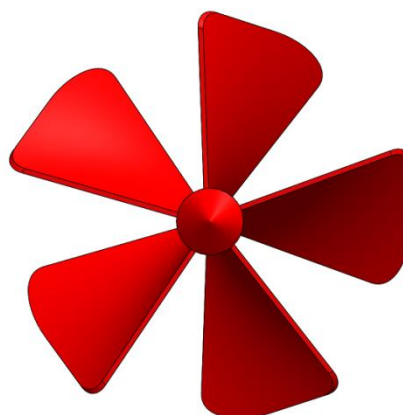
**Radiální ventilátor Obr. 3-1** - princip fungování tohoto ventilátoru je nasávání chladícího média v axiálním směru a následné vytlačování za pomoci odstředivé síly na vnější okraj ventilátoru. Následně je ve většině případů ložiskovým štítem směřován do požadovaných míst. Nevýhodou tohoto typu ventilátoru je především malá účinnost. [18]

**Axiální ventilátory Obr. 3-2** - tento typ ventilátoru nasává i vytlačí chladící médium v axiální ose. Používá se především u vysokootáčkových strojů. Při různých požadavcích na velikost otáček a možnosti reverzace otáček se používají tři typy lopatek.

Pro stroje s reverzací se používají lopatky s radiálním uspořádáním. Pro pomalu běžné stroje, s jedním směrem otáčení se používají lopatky se zahnutým koncem ve směru otáčení. Pro rychloběžné stroje jsou konce lopatek zahnuty směrem dozadu. [18]



**3-1: Radiální ventilátor**



**3-2: Axiální ventilátor**

Všechny ventilátory je možno použít i v opačném směru než byly navrženy, avšak ventilátory navržené pro určitý směr otáčení pracují při opačné straně s mnohem menší účinností a s menším průtokem vzduchu. [18]

## 4 ASYNCHRONNÍ ELEKTRICKÝ STROJ

Asynchronní motory jsou v dnešní době nejpoužívanějším typem motorů, tento typ motoru se velmi výjimečně používá také v režimu generátoru.

Používají se k pohánění nejrůznějších typů zařízení, hlavně díky levné pořizovací ceně, jednoduché konstrukci, nenáročné údržbě a spolehlivosti při provozu.

Tento typ motorů se vyrábí v rozmezí výkonů od několika wattů až do desítek megawattů, a také v provedení jednofázovém i třífázovém, to také přispívá k širším možnostem využití.

Asynchronní motory se používají například pro pohánění čerpadel, ventilátorů, různých stavebních strojů, obráběcích strojů a dalších.[2],[15]

# 5 KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍHO STROJE

Konstrukce asynchronního stroje se skládá ze dvou hlavních částí, statoru a rotoru. Tyto části zastávají nejdůležitější funkční vlastnosti a vytváří točivý moment, ale bez dalších komponentů by nemohl být sestaven kompletní asynchronní stroj, proto je potřeba ještě následujících komponentů: ložiskové štíty, hřídel rotoru, skříň motoru, ventilátor, kryt ventilátoru a ložiska.

## **Rotor**

Rotor je pohyblivá část motoru a je složen z rotorových plechů, ve kterých je v drážkách uloženo rotorové vinutí. Dělí se podle typu kotvy na rotory s kotvou na krátko a s kotvou kroužkovou.[14],[12]

## **Stator**

Stator je tvořen svazkem statorových plechů. V polozavřených drážkách je uloženo statorové vinutí tak, aby byly fáze vůči sobě posunuty o určitý úhel. U třífázového vinutí o  $120^\circ$  jsou konce vinutí fází vyvedeny na svorkovnici, kde jsou svorky uspořádány, aby bylo možné zapojit motor do hvězdy, i do trojúhelníku.[14],[12]

## **Ložiskové štíty**

Ložiskové štíty slouží k uzavření vnitřní části motoru z přední i zadní strany. Vyrábí se z oceli, šedé litiny, nebo hliníkového odlitku vyrobeného pod tlakem. Způsob provedení konstrukce v přechodu ke statoru určuje stupeň krytí motoru.[14],[12]

## **Hřídel rotoru**

Hřídel je tvořena z oceli a je ni upevněn svazek rotorových plechů. Přední i zadní konec vyčnívají skrz ložiskové štíty po obou stranách. Na zadní straně je na tento vyčnívající konec upevněn ventilátor pro nucené proudění vzduchu potřebné pro

chlazení. Může být doplněn i dalšími systémy, jako jsou mechanické brzdy, snímače, a další. Na přední straně je konec upraven pro připojení zátěže.[14],[12]

### **Skříň motoru**

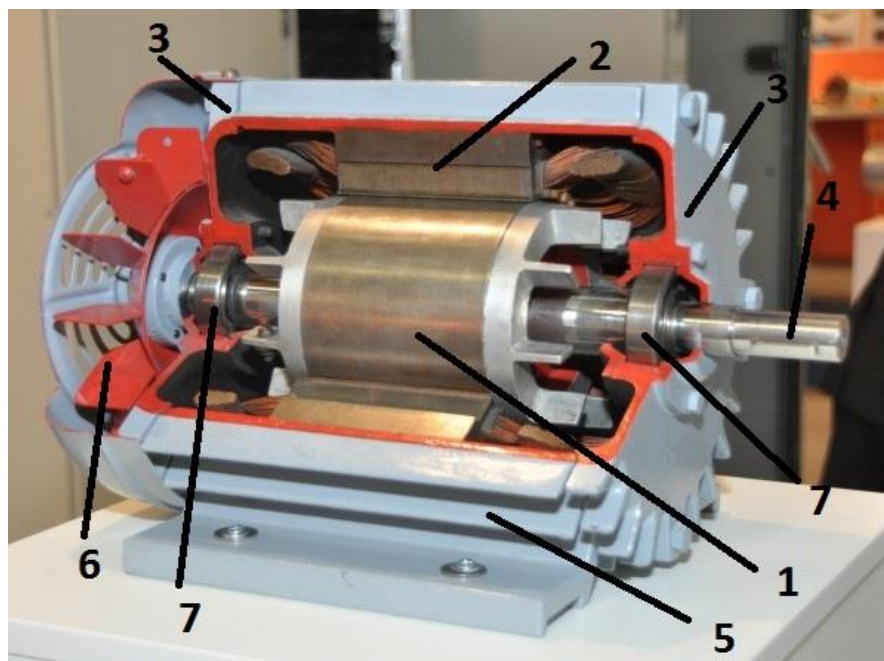
Tyto skříně jsou vyráběny jak z šedé litiny, tak u menších výkonů z hliníkového odlitku vyrobeného pod tlakem. Na vnější straně této skříně jsou vytvarována chladicí žebra, z důvodu zvětšení chladicí plochy motoru a lepší odvod ztrátového tepla do okolí stroje. Dále je na skříň umístěna svorkovnice s připojenými statorovými vinutími, aby bylo možné motor připojit k napájecí síti a v neposlední řadě typový štítek s údaji o typu motoru.[14],[12]

### **Ventilátor, kryt ventilátoru**

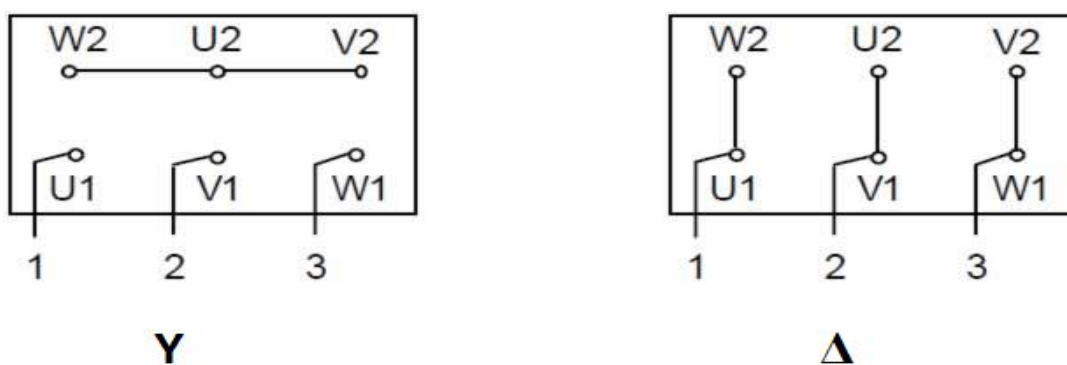
Radiální ventilátor umístěn na zadní straně hřídele slouží k nucenému proudění vzduchu. Tento vzduch je regulován krytem ventilátoru do požadovaného směru podél vnější strany kostry. Kryt ventilátoru slouží nejen jako ochrana ventilátoru před vniknutím pevných předmětů, podle velikosti oka mřížky v krytu, ale také k nasměrování proudícího vzduchu na žebra motoru.[14],[12]

### **Ložiska**

Ložiska jsou umístěna v ložiskových štítech a zajišťují více funkcí. Nejenže mechanicky spojují nepohyblivé části s pohyblivým rotorem, ale také musí splnit těsnící funkci. Použitý typ ložiska se volí podle požadovaného stupně těsnění, typu ložiska (kuličkové nebo válečkové) a mechanické síly, která je tvořena otáčkami hřídele, jež na ložiska bude působit.[14],[12]



Obr. 5-1: Řez asynchronním motorem



Obr. 5-2: Zapojení motoru Y nebo Δ

## 6 ZTRÁTY V ASYNCHRONNÍM STROJI

V každém elektrickém stroji se objevují ztráty. Tyto ztráty představují elektrickou energii, která byla do stroje přivedena z napájecí sítě, ale z důvodu existujících ztrát ve stroji, byla přeměněna z elektrické energie nejčastěji na energii tepelnou. Tato tepelná energie se přenáší z místa vzniku do okolí, toto okolí je následně zvýšením teploty ovlivňováno a může měnit své parametry. Mění se například odpor vodičů, magnetické charakteristiky a také mechanické vlastnosti dílů, kterým se zvyšující se provozní teplotou klesá životnost (ložiska).

Velikost těchto ztrát negativně ovlivňuje účinnost stroje, tato účinnost je dána rozdílem přiváděného příkonu ( $P_1$ ) a následného výkonu na hřídeli ( $P_2$ ). [11],[12]

**Účinnost:**

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\Sigma}} \cdot 100 \quad [-] \quad (6.1)$$

Kde:

$\eta$	...	Účinnost	[-]
$P_1$	...	Příkon	[W]
$P_2$	...	Výkon na hřídeli	[W]
$P_{\Sigma}$	...	Celkové ztráty	[W]

**Příkon motoru  $P_1$ :**

$$P_1 = P_2 + \Delta P_{\Sigma} \quad [W] \quad (6.2)$$

Kde:

$P_1$	...	Příkon	[W]
$P_2$	...	Výkon na hřídeli	[W]
$P_{\Sigma}$	...	Celkové ztráty	[W]



Ztráty se dají rozdělit, na několik hlavních zdrojů, ze kterých se následně spočítají celkové ztráty stroje.

**Celkové ztráty:**

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{J1} + \Delta P_{J2} + \Delta P_d \quad [W] \quad (6.3)$$

Kde:

$\Delta P_{Fe}$	...	Ztráty v železe (mag. obvod)	[W]
$\Delta P_{mech}$	...	Ztráty mechanické	[W]
$\Delta P_{J1}$	...	Ztráty ve vinutí statoru	[W]
$\Delta P_{J2}$	...	Ztráty ve vinutí rotoru	[W]
$\Delta P_d$	...	Ztráty dodatečné	[W]

Ztráty v železe  $\Delta P_{Fe}$ , neboli ztráty v magnetickém obvodu.

Tyto ztráty jsou kombinací ztrát hysterezních  $\Delta P_h$  a ztrát vniklé vířivými proudy  $\Delta P_v$ . Oboje tyto ztráty jsou závislé na materiálových vlastnostech použitých materiálů.

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_v \quad [W] \quad (6.4)$$

Hysterezní ztráty:

$$\Delta P_h = k_n \cdot f \cdot B_m^2 \cdot m \quad [W] \quad (6.5)$$

Ztráty vířivými proudy:

$$\Delta P_v = k_v \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot m \quad [W] \quad (6.6)$$

Kde:

$k_h; k_v$	...	Koeficienty závislé na materiálu a tloušťce plechů	[-]
------------	-----	--	-----

f	...	Frekvence	[Hz]
B <sub>m</sub>	...	Maximální hodnota mag. indukce	[T]
m	...	Hmotnost magnetického materiálu	[kg]

Ztráty ve vinutích (Joulovy ztráty).

Tyto ztráty se dále dělí na ztráty ve vinutí rotoru  $\Delta P_{J1}$  a ve vinutí statoru  $\Delta P_{J2}$ . Tyto ztráty jsou závislé na odporu vinutí, protékajícím proudem a počtu fází.

**Ztráty ve vinutí statoru:**

$$\Delta P_{J1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad [\text{W}] \quad (6.7)$$

**Ztráty ve vinutí rotoru:**

$$\Delta P_{J2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad [\text{W}] \quad (6.8)$$

Kde:

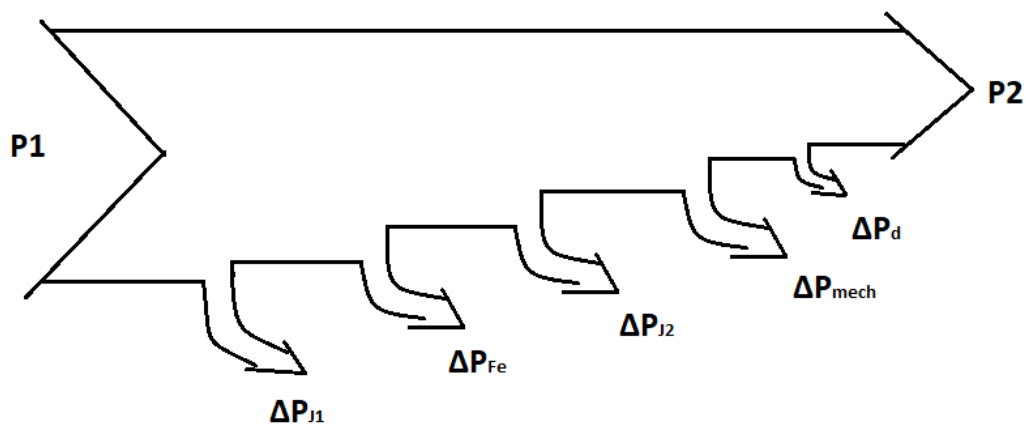
m <sub>1</sub>	...	Počet fází vinutí statoru	[-]
m <sub>2</sub>	...	Počet fází vinutí rotoru	[-]
R <sub>1</sub>	...	Odpor vinutí statoru	[Ω]
R <sub>2</sub>	...	Odpor vinutí rotoru	[Ω]
I <sub>1</sub>	...	Proud vinutím statoru	[A]
I <sub>2</sub>	...	Proud vinutím rotoru	[A]

Ztráty mechanické  $\Delta P_{\text{mech}}$ .

Tyto ztráty se projevují v podobě vyššího opotřebení kartáčů, tření ložisek, ventilačních ztrát a dalších nežádoucích účinků. Tyto ztráty jsou závislé na rychlosti otáčení rotoru.

Ztráty dodatečné  $\Delta P_d$ .

Mezi tyto ztráty se řadí například ztráty vyšších harmonických, vířivými proudy v hmotách blízkých vinutí a ztráty komutátorové. [11],[12]



Obr. 6-1: Zobrazení ztrát asynchronního motoru [11]

# 7 MĚŘENÍ TEPLoty ASYNCHRONNÍHO MOTORU

Měření teploty u elektrických strojů je důležitou součástí diagnostických měření motoru. Používá se k získání dat o teplotě uvnitř i vně daného stroje. Toto měření je však velice problematické. Ve většině případů se nejedná o jedno měření, ale buď o sérii opakovaných měření, nebo o měření za pomoci více čidel současně. Opakované měření je komplikovanější z důvodu problematického zajištění stejných podmínek, a to například stejné okolní teploty.

Z měření probíhajícího vždy v určitých časových intervalech, jsou získaná data dále použita například pro vytvoření oteplovací nebo i ochlazovací křivky.

Způsoby měření lze rozdělit na dvě metody, kontaktní a bezkontaktní. [21]

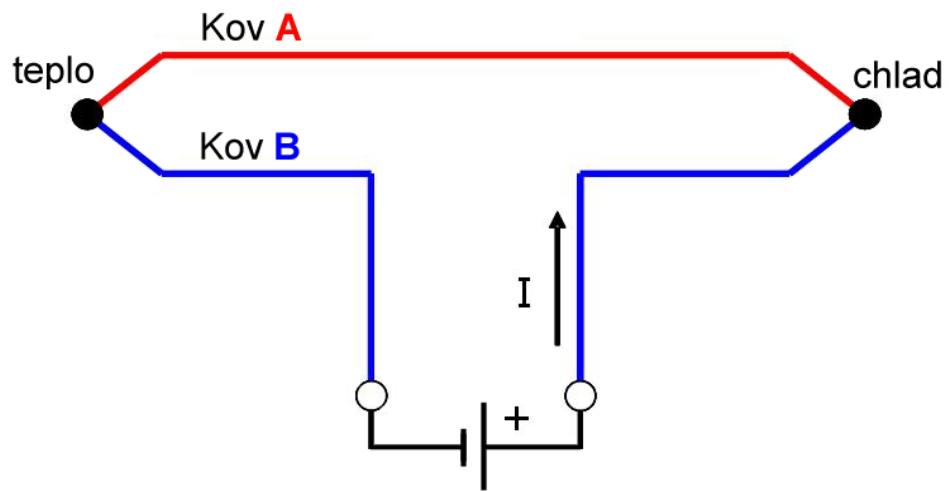
## 7.1 Kontaktní metoda

Tato metoda spočívá v přímém kontaktu měřeného místa/povrchu s teplotním čidlem. Tuto metodu využívají například termoelektrické senzory.[21]

### 7.1.1 Termoelektrické senzory

Termoelektrické senzory využívají pro změření teploty Seebeckův jev, tedy převod tepelné energie na elektrickou. Seebeckův jev vzniká při spojení dvou materiálů různých kovů nebo polovodičů, kdy spojené konce mají rozdílnou teplotu  $T_1$  a  $T_2$ . V tomto případě vzniká v obvodu malé, ale měřitelné napětí viz Obr. 7-1.

Podle velikosti tohoto termoelektrického napětí měřicí přístroj vyhodnocuje výslednou teplotu měřeného místa. [21]



Obr. 7-1: Princip Seebeckova jevu [22]

## 7.2 Bezkontaktní metoda

Při této metodě nedochází ke kontaktu měřeného místa s čidlem, ale je využito vlastního elektromagnetického záření tělesa, které vysílá do okolí.

Tuto metodu využívají pyrometry a termovize.[21]

# 8 MODELOVÁNÍ OTEPLENÍ ELEKTRICKÉHO STROJE

## 8.1 Modelování

Modelování probíhalo v programu Solidworks. Tento strojírenský CAD program je zaměřen především na 3D modelování, avšak jeho součástí jsou i různé výpočetní části, jako například proudění vzduchu, rozložení teplot a další parametry.

Tento program nabízí výkonné objemové i plošné modelování, disponuje nástroji pro plechové díly, formy a svařené části. Ze všech těchto typů dílů dokáže generovat výkresovou dokumentaci.

Hlavními výhodami programu SOLIDWORKS jsou intuitivní a vizuálně snadné ovládání postavené na technologii SWIFT, které je současně uživatelsky velice přívětivé.

Disponuje velkým množstvím jak základních (například zaoblení, zkosení), tak i pokročilých pracovních nástrojů (svaření, použití strojních vazeb a další). Nespornou výhodou je velké množství typu formátů exportovaných dat spolupracující s výpočetními programy. [3]

## 8.2 Výpočetní program Ansys Workbench

Tento program nabízí kompletní softwarovou sadu pro výpočty. Pokrývá celý rozsah fyzikálních výpočtů a také výpočty ve vysokém rozsahu inženýrských simulací, tyto jsou potřebné pro proces návrhu nových zařízení. [4]

Ansys používá pro své výpočty metodu konečných prvků. Disponuje schopností simulovat většinu konstrukčních problémů produktu. Zahrnuje v sobě nelineární statickou analýzu (napětí a deformace), modální analýzu (vibrace), nelineární přechodné jevy (dynamické efekty) a komplexní materiálové chování.

Na základě nastavení parametrů objektu (rozměr, materiál, tvar) a parametrů potřebných pro analýzu (okrajové podmínky, typ analýzy a další) je možné vypočítat požadované veličiny s vysokou přesností, následné výsledky je možno exportovat v mnoha podobách (grafických, vizuálních a ve formě tabulek). [5]

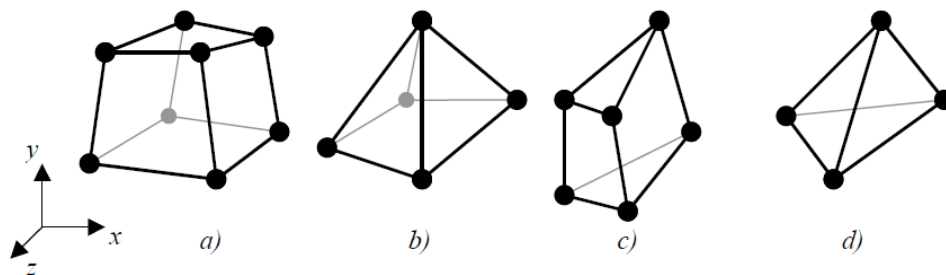
Samotný Ansys Workbench disponuje zjednodušeným ovládním pomocí bloků, každý blok pak představuje jiný typ analýzy, mezi kterými se dají data navzájem propojovat za pomoci přesunu vstupních dat z prvotní analýzy do několika dalších. Každý blok má pak v sobě další moduly, kde je nutné postupně nastavit požadované hodnoty a parametry. V každém modulu se nastavuje něco jiného, od použitých materiálů, přes 3D model, až po požadované výstupy analýzy.

### 8.3 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků byla vyvinuta pro potřebu výpočtů konstrukcí v leteckém, kosmickém, vojenském, jaderném, elektrickém odvětví průmyslu a mnoha jiných.

Tato metoda vychází z variačních principů a v dnešní době je považována za zcela dominantní mezi numerickými metodami. Je možné ji použít pro výpočet řešení v oblastech pružnosti a dynamiky, díky její variaci je možné ji použít i na proudění kapalin, plynů, šíření a rozložení tepla, záření, šíření elektromagnetismu, akustické šíření a v neposlední řadě i pro výpočet mechanických vlastností.

Jak už název metody prozrazuje, základem je prvek konečných rozměrů. Pro použití MKP pro výpočet je nutné řešenou oblast (model) rozdělit na konečný počet podoblastí neboli prvků. Samotný model se tedy rozdělí pomocí "sítě" konečných prvků složené z čtyřúhelníků, trojúhelníků a mnohoúhelníků. Vrcholy těchto  $n$ -úhelníků se považují za uzly, ve kterých bude následně probíhat výpočet. Kvalita výsledků výpočtu je přímo závislá na množství uzlů v modelu. Čím více má model uzlů tím je výpočet kvalitnější, avšak výpočet je zdlouhavý. S menším množstvím uzlů proběhne výpočet rychleji. Je tedy důležité zvolit kompromis mezi množstvím uzlů, časovou a hardwarovou náročností a kvalitou výpočtu. [13]



Obr. 8-1: Příklad možných tvarů prvků sítě [13]

## 9 POUŽITÝ TYP ELEKTRICKÉHO STROJE

Pro tuto práci byl zvolen asynchronní motor, vhodný k připojení k síti 3x400/230V 50 Hz. Tento motor je i fyzicky k dispozici ve školní laboratoři, což je výhodné z důvodů doměřování rozměrů motoru pro 3D model.

### 9.1 Parametry

**Tab. 9-1: Typový štítek motoru s jeho parametry**

3~50 Hz	Typ: TM90 - 4S B3		
1100 W	μF	S1	
Y/D 400/230 V	1 400 1/min		
2,78/4,68 A	cos: 0,78	IP54	IS.F
22 410 006	No:00252114	2011	



# 10 PRAKTICKÁ ČÁST

Model asynchronního motoru byl vytvořen v programu SOLIDWORKS za pomoci výkresové dokumentace, ale i reálného motoru. Vnitřní díly motoru (statorové plechy, rotor, hřídel) byly vytvořeny podle výkresové dokumentace. Vnější díly (kostra, ložiskové štíty, ventilátor, kryt ventilátoru) byly vytvořeny převážně z naměřených hodnot na reálném motoru, jelikož k těmto dílům byla výkresová dokumentace velice nepřesná.

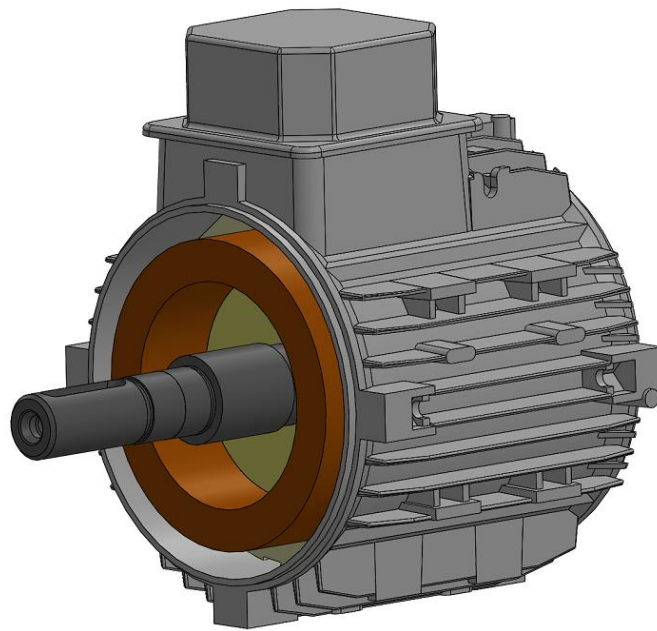
## 10.1 Ustálená teplotní analýza

### 10.1.1 Příprava modelu

Každý jednotlivý díl bylo nutné modelovat s určitou mírou nepřesnosti vůči reálnému motoru, tyto nepřesnosti se týkaly velkého zaoblení, zkosení hran a vrcholů. Tato místa by mohla být následně kritická při vytváření „Mesh“. Některá místa mohla být modelována s určitou mírou nepřesnosti vůči reálnému motoru, a to z důvodu nepotřebnosti pro analýzu.

Po vytvoření 3D modelu jednotlivých dílů, byly vytvořeny různé sestavy motoru pro různé typy analýz. Pro teplotní analýzu byla vytvořena sestava pouze z kostry, statoru, rotoru, hřídele a vinutí statoru.

Následně byl model a sestavy uloženy ve formátu .IGS a importovány do prostředí Ansys Workbench, ve kterém probíhaly následné analýzy.



**Obr. 10-1: Sestava motoru pro teplotní analýzu**

### **10.1.2 Nastavení výpočtu**

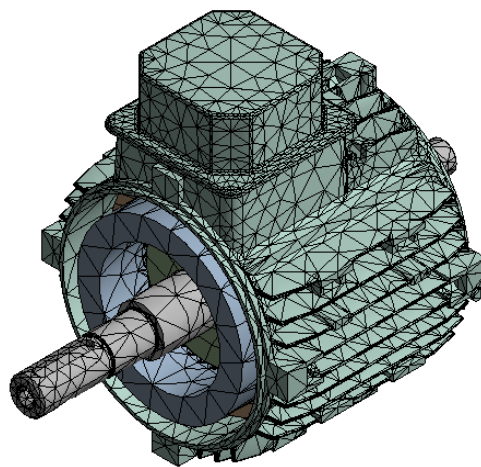
Jako první analýza byla zvolena teplotní analýza „Steady-State Thermal“, následně bylo nutné nadefinovat materiály, které budou použity. Tyto materiály vybíráme z knihovny materiálů „Engineering Data Sources“ a podknihovny „Thermal Materials“. Materiály potřebné pro analýzu jsou vzduch (u kterého bylo nutné změnit parametr „Isotropic Thermal Conductivity“ z 0,25 na 1 W/mC), hliník, měď, nerezová ocel a konstrukční ocel. Po nastavení materiálů bylo možné přejít k dalšímu kroku a tím je nastavení modelu v části „Geometrie“.

V této části nejprve nastavíme požadované jednotky v části „Unit“ na shodné s jednotkami modelu, poté importujeme zvolený 3D model motoru. Po vygenerování modelu zkontrolujeme polohu importovaného modelu, případně orotujeme motor do požadované polohy. Jako poslední krok v této části je nutné vytvořit vzduchové obal okolo motoru, na který budou následně zadány i okrajové podmínky pro výpočet.

Vzduchový obal se vytváří za pomoci funkce „Enclosure“ a může mít více tvarů. Pro teplotní analýzu je dostačující vzduchový obal ve tvaru krychle se stranou 300 mm. Tento vzduchový obal musí mít určitou velikost, nesmí být příliš malý, aby nedocházelo k nepřesnému výpočtu a neměl by být ani moc velký, aby výpočet netrval zbytečně

dlouhou dobu. Nastavení vzduchového obalu je poslední krok v části „Geometrie“ a je možné přejít k nastavení samotné analýzy.

Nastavení parametrů samotné analýzy se provádí v části „Model“, v této části je nutné jako první krok nastavit pro každou část modelu určitý materiál (kostra – hliník, hřídel – konstrukční ocel, rotor a stator – nerezová ocel a vinutí statoru – měď). Dalším krokem je vytvoření „Mesh“, neboli sítě potřebné pro výpočet. Tento krok může být kritický, a to z důvodu přechodu z malých ploch i objemů na velké.

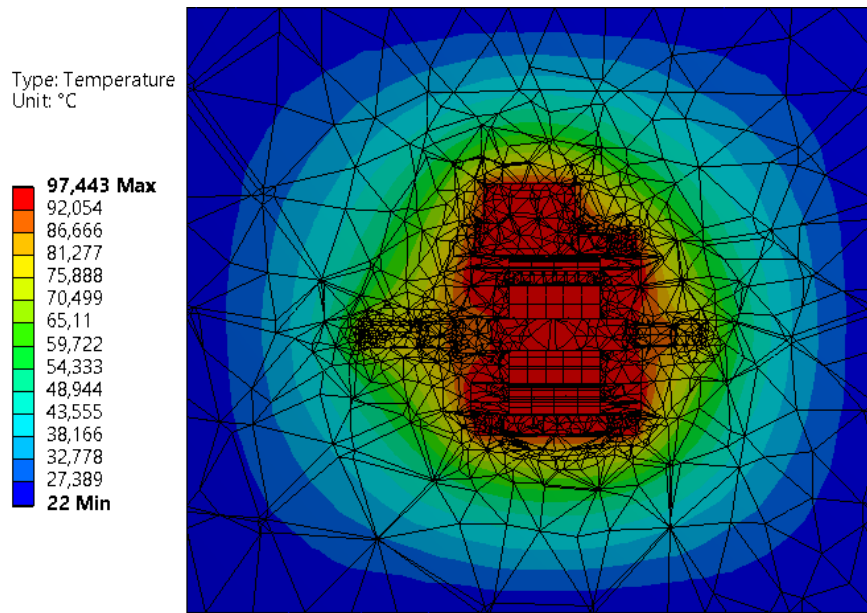


**Obr. 10-2: Model po vytvoření sítě pomocí funkce Mesh**

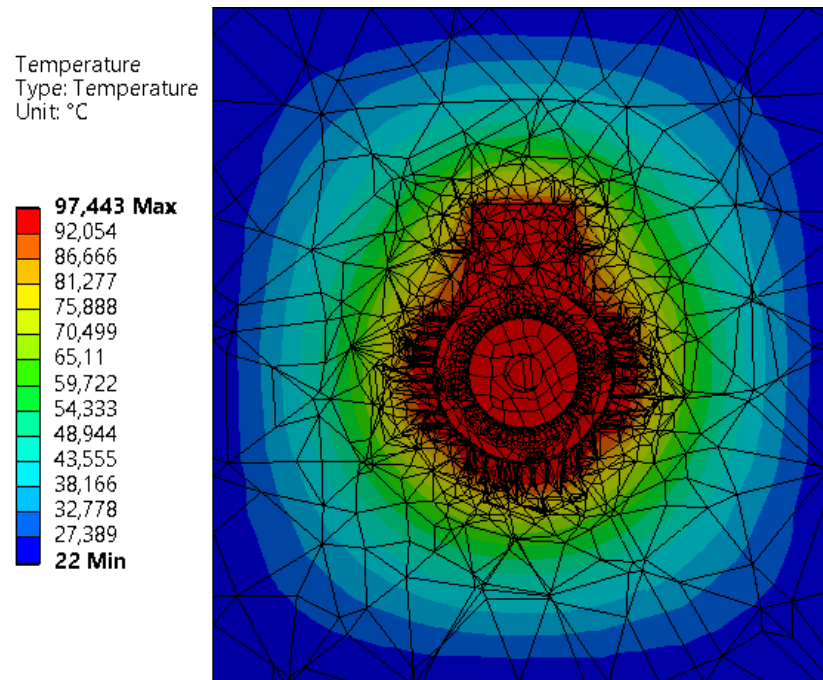
Mezi poslední kroky patří nastavení počátečních parametrů pro výpočet. Jedním z nich je nastavení zdroje generování tepla, ten se nastavuje pod funkcí „Internal Heat Generation“ a je nastavován na objem, v našem případě na vinutí statoru, které generuje ztrátu tepla o velikosti  $172207,7\text{W/m}^3$  a také na samotný stator o velikosti  $99\,573,8\text{W/m}^3$ . Dalším počátečním parametrem je nastavení teploty okolí motoru neboli okrajových podmínek. Za pomoci funkce „Temperature“ a okolní teploty  $22^\circ\text{C}$  nadefinujeme okrajové podmínky na plochy, které představují stěny krychle tvořící vzduchový obal. Po nastavení počátečních parametrů je nutno zvolit, jaké výstupy chceme vypočítat. V našem případě požadujeme výpočet celkové teploty „Temperature“ a za pomoci funkce „Solution“ je možno provést výpočet.

### 10.1.3 Výsledky ustálené teplotní analýzy

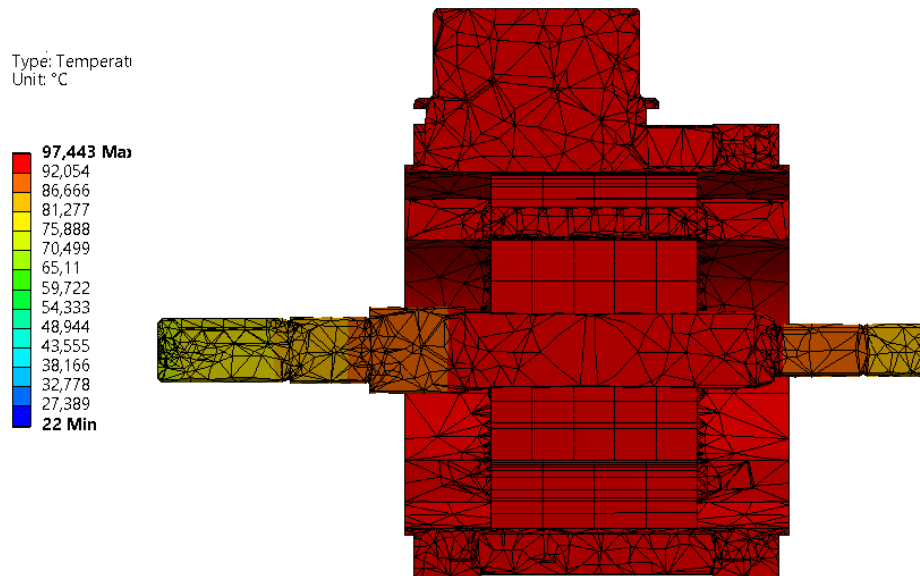
Z výsledků ustálené analýzy lze pozorovat, že ustálená teplota motoru bez nuceného chlazení dosahuje téměř 98°C a teplo se šíří do celého okolí motoru. Je vidět, že celý motor se zahřívá téměř rovnoměrně, výjimku tvoří konce hřídele, kde je teplota nižší než ve zbylé části motoru.



Obr. 10-3: Zobrazení rozložení teploty v ustáleném stavu boční pohled



Obr. 10-4: Zobrazení rozložení teploty v ustáleném stavu přední pohled



**Obr. 10-5: Zobrazení rozložení teploty v ustáleném stavu, boční pohled pouze motor**

## 10.2 Výpočet oteplovací křivky

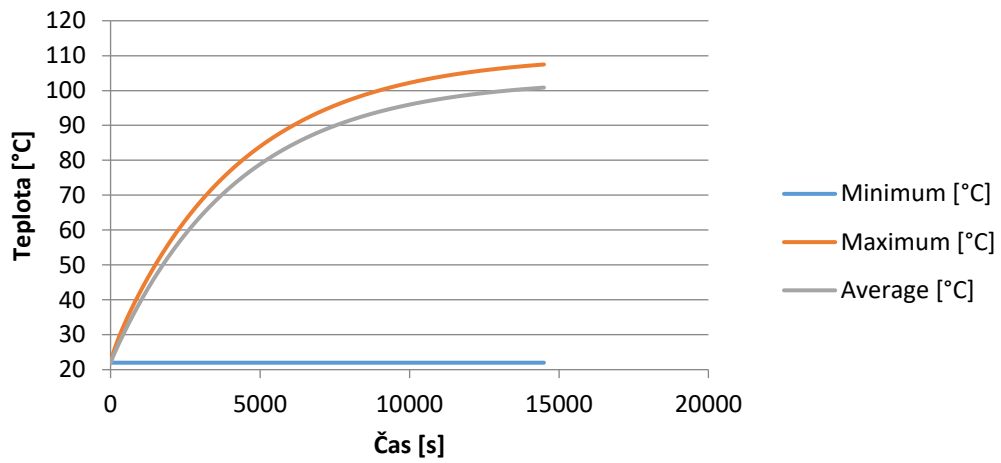
Tento typ analýzy je téměř totožný s předešlým typem. Části „Geometrie“, „Model“ a „Mesh“ jsou navoleny shodně, stejně tak pracujeme s původními vstupními a výstupními parametry i materiály. Jedinou částí, ve které se analýza liší je samotné nastavení „Setup“.

Nastavení analýzy se provádí ve funkci „Analysis Setting“ kde je nutno předvolit koncový čas (v našem případě 21 600s), je možno určit i počet kroků probíhajícího výpočtu a zbylé parametry tak, aby výsledky dosahovaly požadované přesnosti.

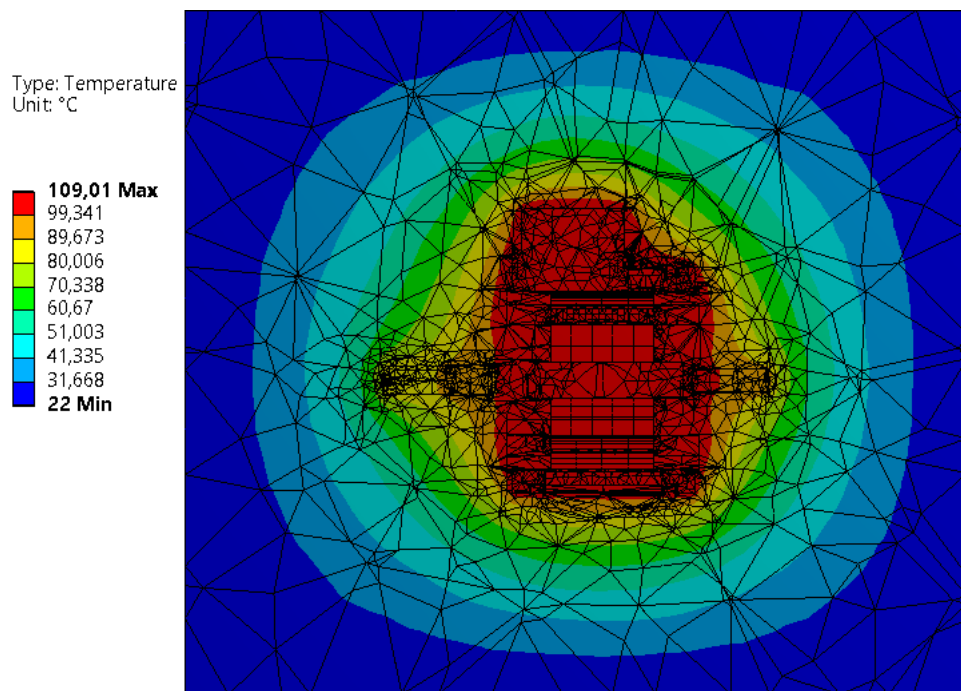
### 10.2.1 Výsledky

Z grafu lze vidět, jak teplota po zapnutí motoru vzrůstá a postupně se ustaluje na teplotě dosahující téměř 109°C, této hodnoty bylo však dosaženo až po 5 hodinách od zapnutí motoru. Je vidět, že motor se znovu zahříval shodně s předchozí analýzou a nejchladnější částí motoru jsou konce hřídele.

## Oteplovací charakteristika asynchronního motoru

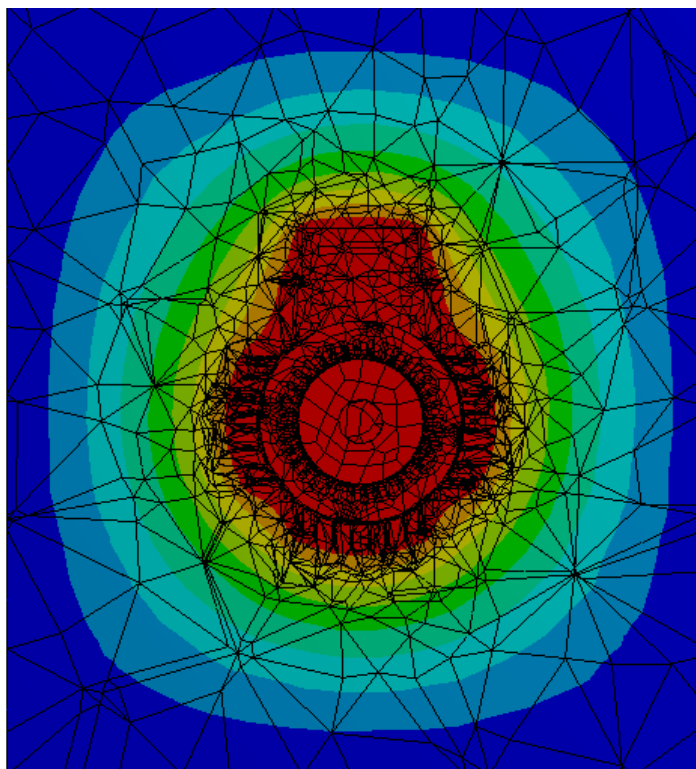
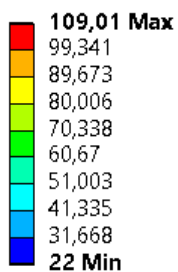


Obr. 10-6: Oteplovací charakteristika asynchronního motoru



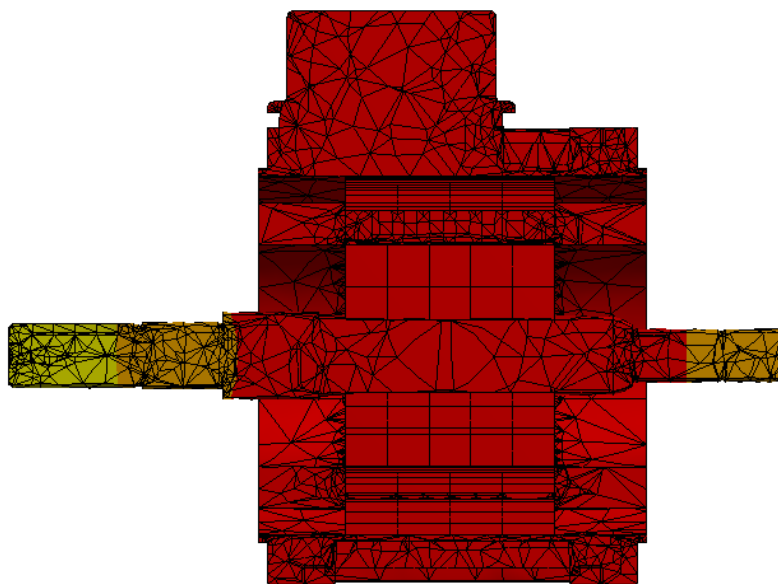
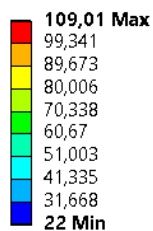
Obr. 10-7: Zobrazení rozložení teploty boční pohled

Type: Temperature  
Unit: °C



**Obr. 10-8: Zobrazení rozložení teploty přední pohled**

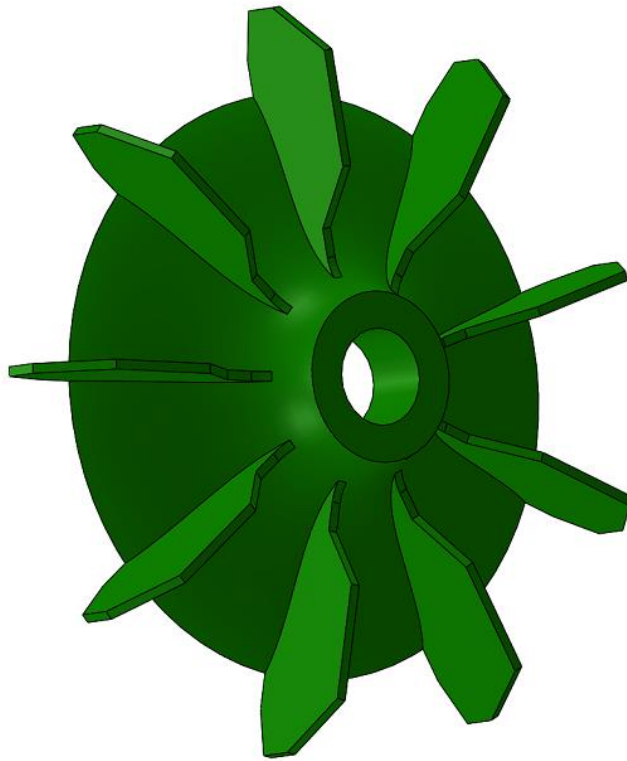
Type: Temperature  
Unit: °C



**Obr. 10-9: Zobrazení rozložení teploty, boční pohled pouze motor**

## 10.3 Proudění vzduchu v okolí ventilátoru CFX Analýza

Pro tento typ analýzy byl použit předchozí model ventilátoru. K analýze je potřeba venkovní geometrie ventilátoru, nikoliv druh použitého materiálu, nerozhoduje ani jeho plnost či dutost látky.



Obr. 10-10: Model ventilátoru

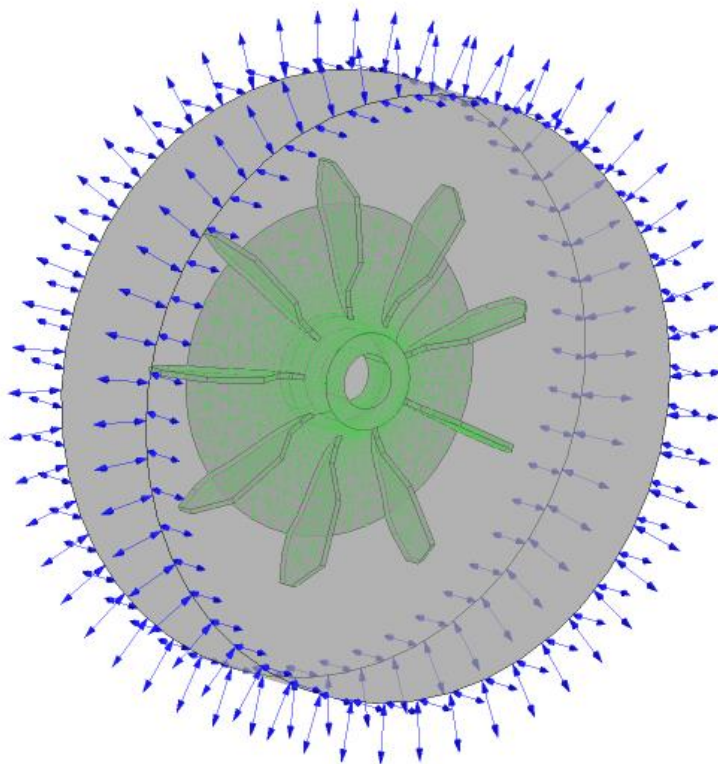
### 10.3.1 Nastavení výpočtu

Jako první byla nadefinována simulace rotujícího ventilátoru. V části „Geometry“ je nutno nastavit jednotky na milimetry v části „Unit“. Následuje import modelu do programu, po jeho nahrání byl vytvořen vzduchový obal válcovitého tvaru vzdálený 1 mm od ventilátoru a současně 30 mm z přední a 1 mm ze zadní strany. V neposlední řadě bylo nutno na model ventilátoru použít funkci „Supress Body“ pro zachování výhradně vnější geometrie ventilátoru. Závěrečným důležitým krokem v této části, je nastavení modelu jako „Solid“ a vzduchového obalu jako „Fluid“, toto nastavení materiálu se provádí v nabídce „Details View“.



Následně je nutno vygenerovat „Mesh“ nezbytnou pro výpočet a použít funkci „Update Upstream Components“.

Posledním krokem je nastavení parametrů pro výpočet v části „ Setup“, Nejdříve je potřeba nastavit „Defaul Domain“, v tomto oddílu je nutno změnit Domain Motion“ na „Rotating“ a nastavit požadovanou rychlost, v našem případě na 200 ot/min. Dále je nutno nastavit vstupní podmínky pro obal za pomoci přidání meze „Boundary“. V ní zvolit „Boundary Type“ na „Openning“ pro přední část ventilátoru, následkem čehož může vzduch proudit všemi směry, „Wall“ pro vnější okraj obalu a „Outlet“ pro část za ventilátorem, takže tudy může vzduch proudit pouze ven. Ventilátor je naopak nastaven na „Wall“ v základní mezi „Default Domain Default“, tedy vzduch nemůže projít skrz, ale pouze proudit po povrchu.

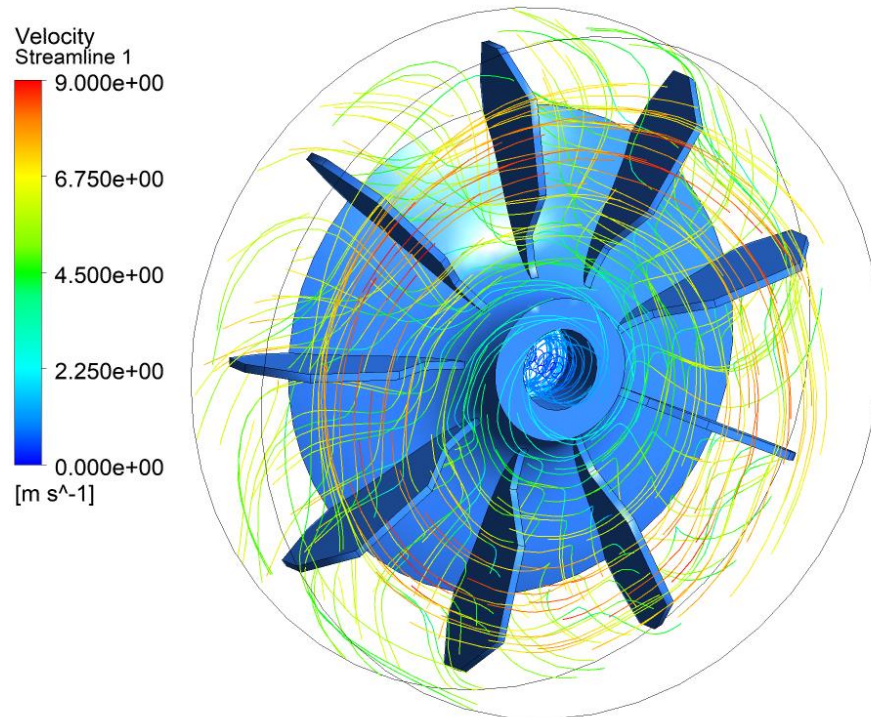


**Obr. 10-11: Nastavení parametrů pro výpočet, ventilátor**

Po tomto nastavení spustíme část „Solution“ a v případě, že jsou všechny údaje a funkce nastaveny správně, proběhne požadovaný výpočet. Výsledky lze zobrazit ve formátu a vizuálním zobrazení dle potřeby.

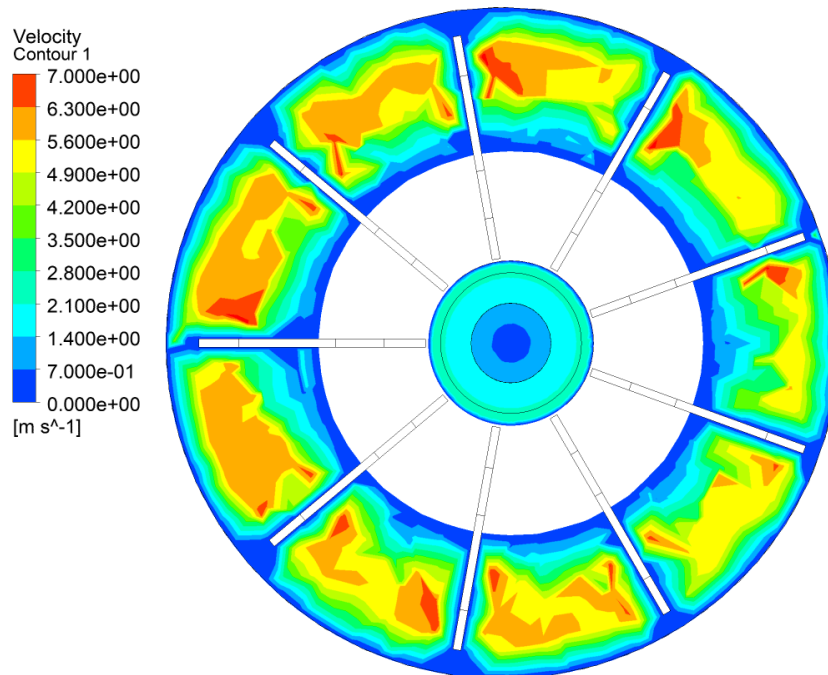
Výpočet pro rychlost 200 ot/min byl následně proveden i pro vyšší rychlosti až do hodnoty 1 600 ot/min, které jsou o 200 ot/min větší, než jmenovité otáčky motoru.

### 10.3.2 Výsledky CFX analýzy



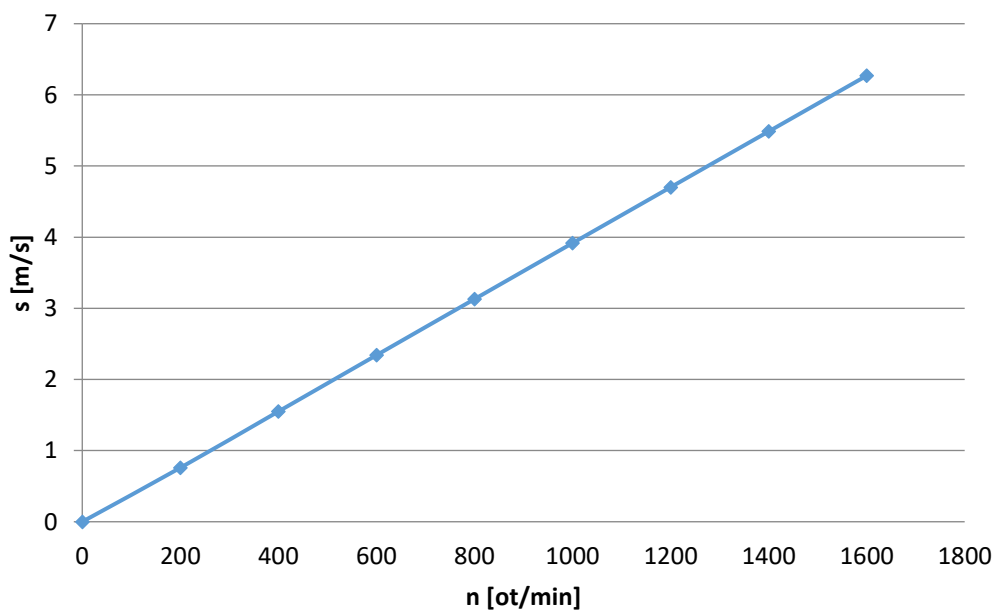
**Obr. 10-12: Zobrazení proudnic pro otáčky  $n = 1\,400$  ot/min**

Pro přesné zobrazení a rozložení proudění vzduchu kolem ventilátoru byla vytvořena rovina 5 mm od zadní strany ventilátoru Obr. 10-13. Na níž je zřetelně vidět, že s narůstající vzdáleností od středu stoupá rychlost vzduchu, kde dosahuje rychlosti okolo 14 m/s u hranice zobrazované oblasti.

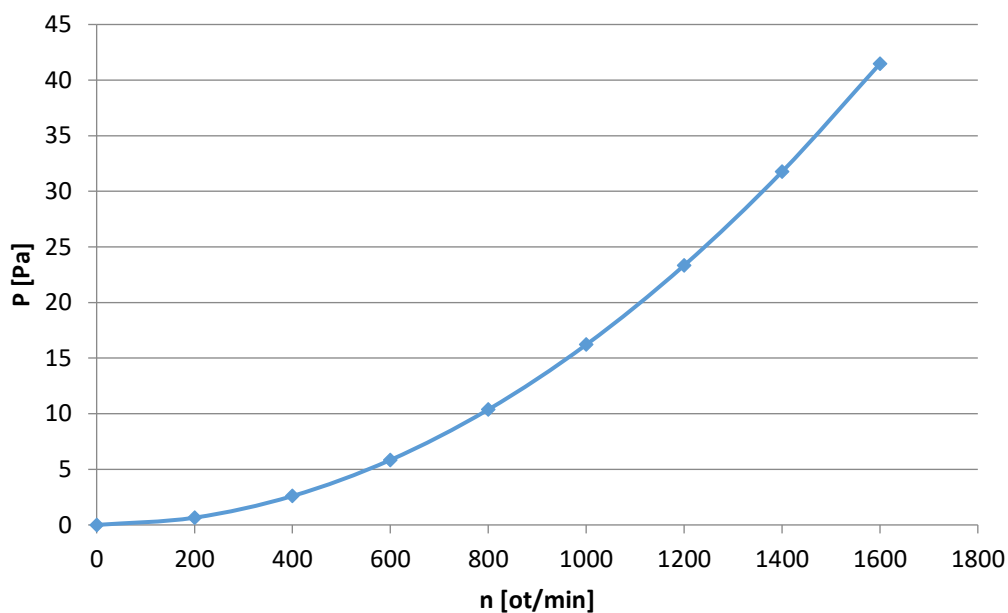


**Obr. 10-13 : Proudnicie pro  $n = 1\,400$  ot/min na řezné rovině**

V našem případě byla měřena průměrná rychlost a tlak vzduchu působícího na stěnu vzduchového obalu.



**Obr. 10-14: Závislost rychlosti vzduchu na velikosti otáček ventilátoru**

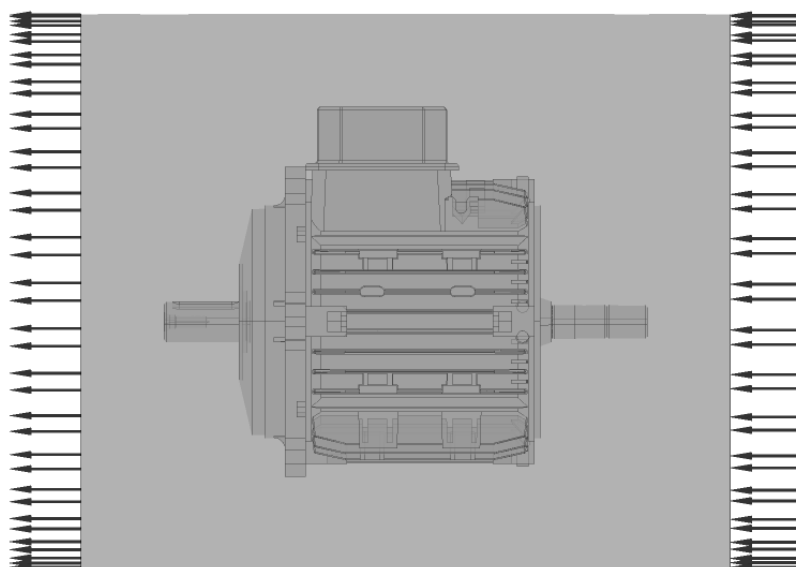


**Obr. 10-15: Závislost tlaku vzduchu na velikosti otáček**

## 10.4 Proudění vzduchu v okolí motoru CFX Analýza

Pro tento typ analýzy je sestava motoru spojena v jeden celek, jelikož je potřeba pouze venkovní geometrie, nezáleží na vnitřním uspořádání motoru.

K simulacím proudění vzduchu bylo vytvořeno více modelů motoru s určitým množstvím komponentů, avšak vždy bez ventilátoru. Prvním modelem byl motor bez zadního ložiskového štítu, kde je obvykle umístěn ventilátor, a druhým i s ložiskovým štítem.



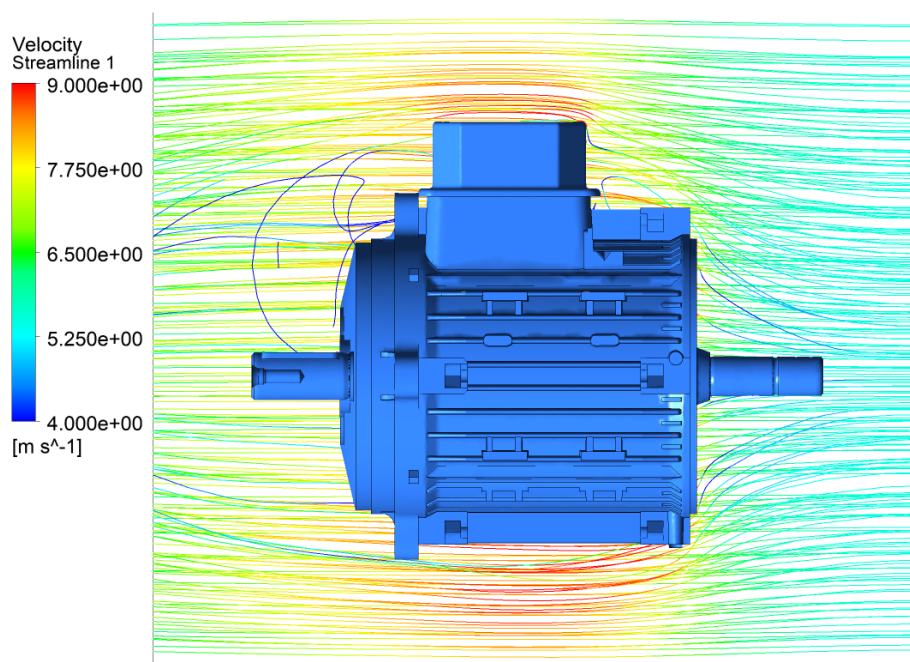
**Obr. 10-16: Model motoru se vzduchovým obalem**

Při přípravě simulace proudění vzduchu okolo motoru se postupuje téměř totožně jako při předchozí simulaci. V části „Geometry“ se nastavování liší pouze ve velikosti vzduchového obalu, a to na vzdálenost 50 mm ve všech směrech od motoru.

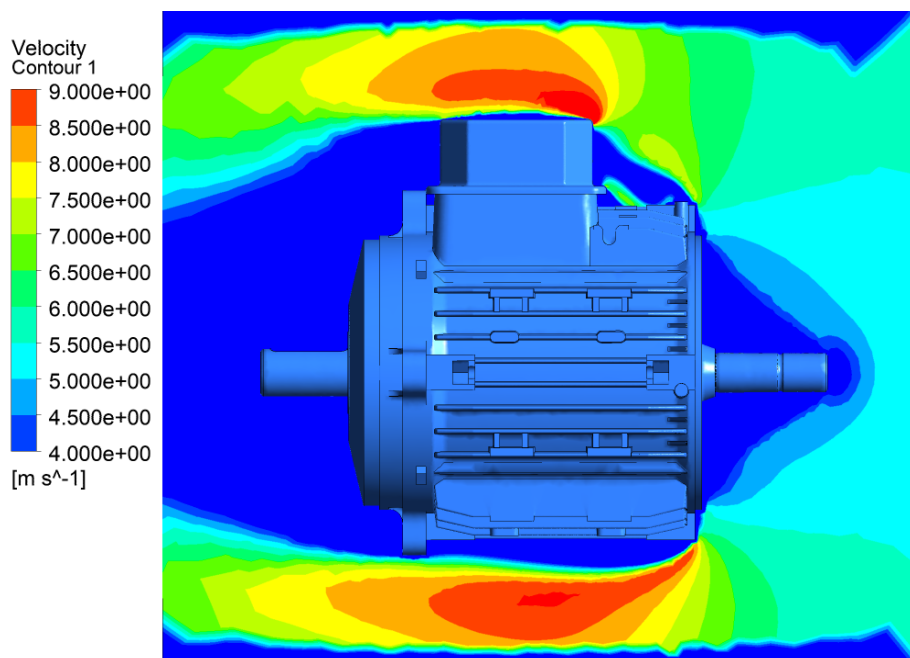
Mesh byla vytvořena stejně, jako v předešlém případě.

Posledním krokem je volba parametrů pro výpočet v části „Setup“, u této simulace nebylo potřeba nastavovat „Default Domain“. Poté bylo nutno přidat meze pro obal. První pro okolní stěnu obalu jako „Wall“, dále mez pro přední stěnu obalu jako „Outlet“ a zadní stěnu obalu jako „Inlet“ a rychlost vzduchu na 5,5 m/s. Nastavení mezí pro obal je vidět na Obr. 10-16.

### 10.4.1 Výsledky CFX analýzy



**Obr. 10-17: Zobrazení proudění vzduchu v okolí motoru s počáteční rychlostí 5,5 m/s**



**Obr. 10-18: Zobrazení proudění vzduchu na řezné rovině**

Pro přesné zobrazení a rozložení proudění vzduchu byla vytvořena rovina ve středu motoru. Obr. 10-18.

## **10.5 Proudění vzduchu v okolí motoru od ventilátoru CFX**

### **Analýza**

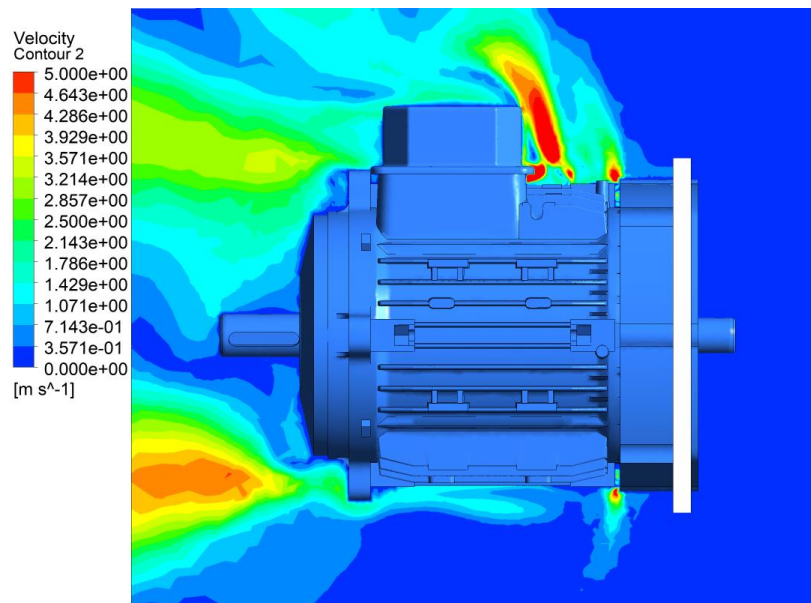
Tento typ analýzy se skládá z výpočtů proudění ventilátoru a analýzy proudění vzduchu okolo ventilátoru, a to za použití jiného modelu oproti předchozí.

#### **10.5.1 Nastavení výpočtu**

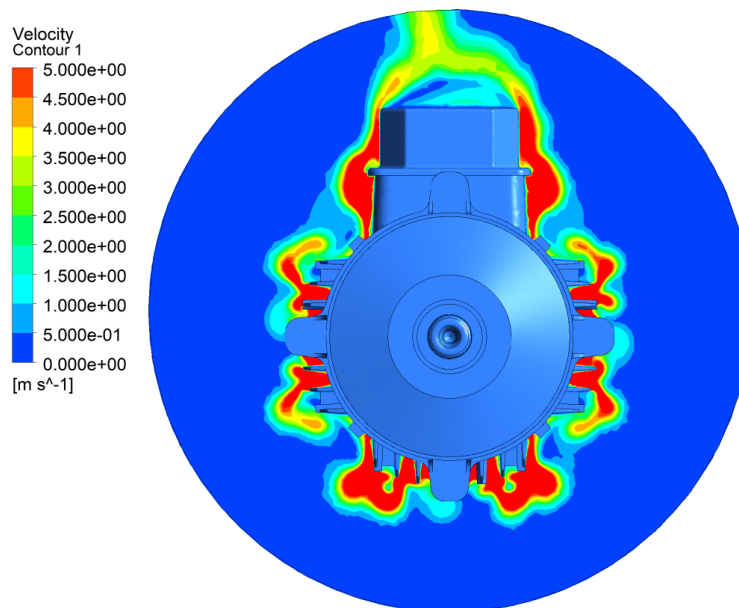
Jako první je potřeba exportovat data o rychlosti proudění vzduchu z ventilátoru při velikosti otáček 1 400 ot/min. V analýze ventilátoru v oblasti "Results" exportujeme data o rychlosti z označené roviny, které poté použijeme pro novou analýzu. Následně vytvoříme novou CFX analýzu stejným postupem, jako u analýzy samostatného motoru, s využitím rozdílného modelu. Změny jsou provedeny až v části "Setup". V této části nastavíme všechny stěny válce představující vzduchový obal na „Openning“, následně válec představující ventilátor také na „Openning“. Odlišně je nastavena strana válce u motoru, té je přiřazena podmínka „Inlet“.

Dále je nutno importovat data ze simulace od ventilátoru, v záložce „Tools“ vybereme „Initialize Profile Data“ a zvolíme vybraný soubor. Přiřazení dat na potřebnou plochu provedeme v okrajové podmínce pro výstup ventilátoru. Označíme „User Profile Data“ a spustíme „Generate Values“, tím jsou data z ventilátoru vložena do nové analýzy a může být spuštěn výpočet, stejně jako v předchozích za pomoci záložky „Solution“.

## 10.5.2 Výsledky pro proudění od ventilátoru

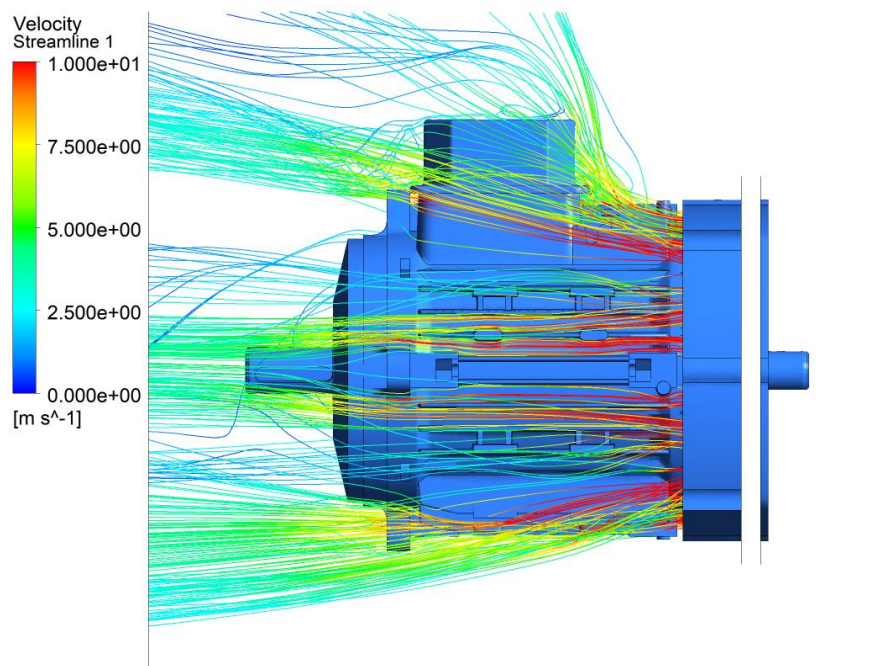


Obr. 10-19: Zobrazení rychlosti proudění vzduchu na řezné rovině, boční pohled

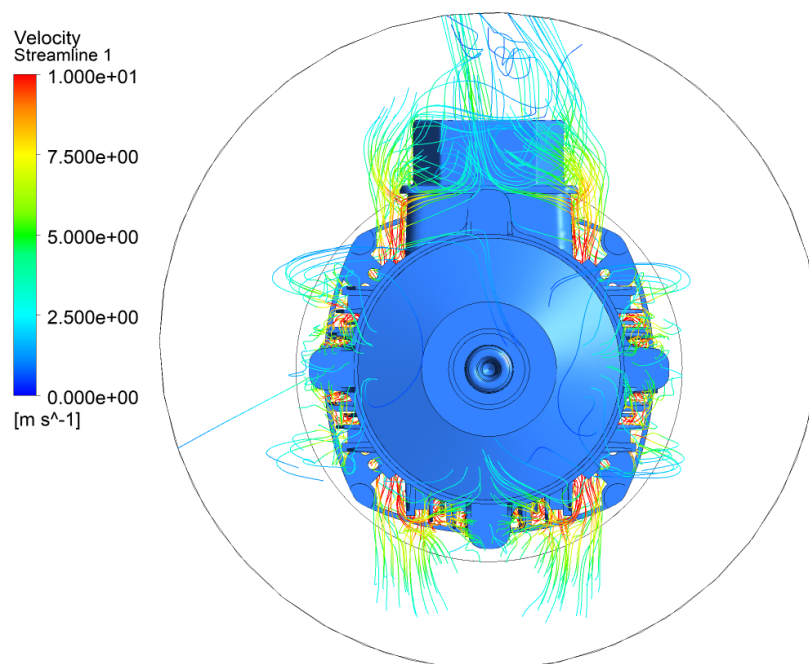


Obr. 10-20: Zobrazení rychlosti proudění vzduchu na řezné rovině, přední pohled





**Obr. 10-21: Zobrazení proudění vzduchu pomocí proudnic boční pohled**



**Obr. 10-22: Zobrazení proudění vzduchu pomocí proudnic přední pohled**

## 10.6 Chlazení motoru, teplotní a CFX analýza

Tato analýza spočívá v kombinaci dat z předešlé simulace chlazení motoru proudícím vzduchem a teplotní analýzy motoru.

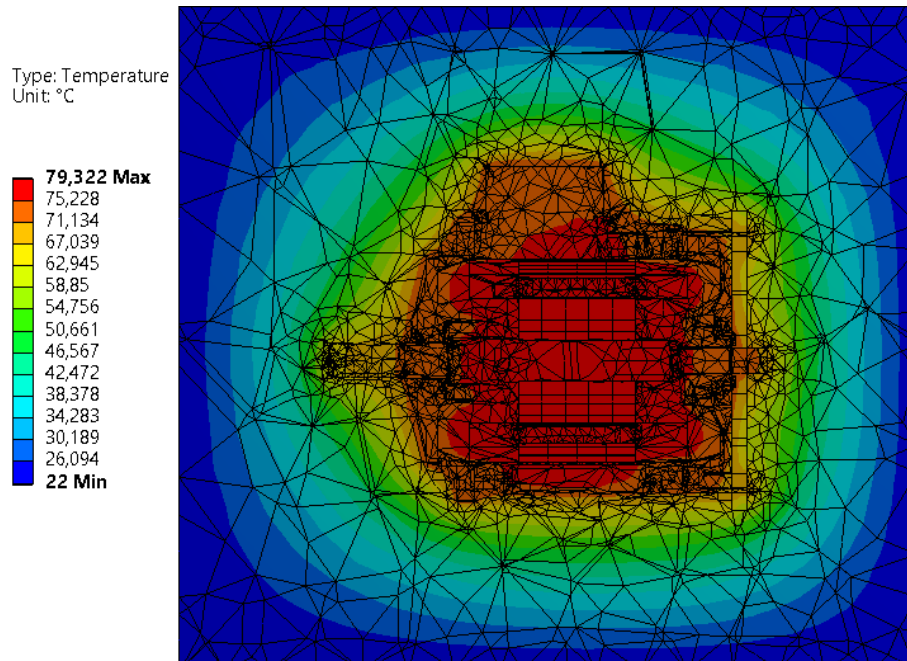
### 10.6.1 Nastavení výpočtu

Získání dat z analýzy proudění vzduchu okolo motoru se provádí už v blokovém zobrazení analýzy, po kliku pravým tlačítkem myši na „Solution“ vybereme „Transfer Data To New“ a následně „Steady State Thermal“. Tímto krokem vytvoříme nový blok pro výpočet teplotní analýzy.

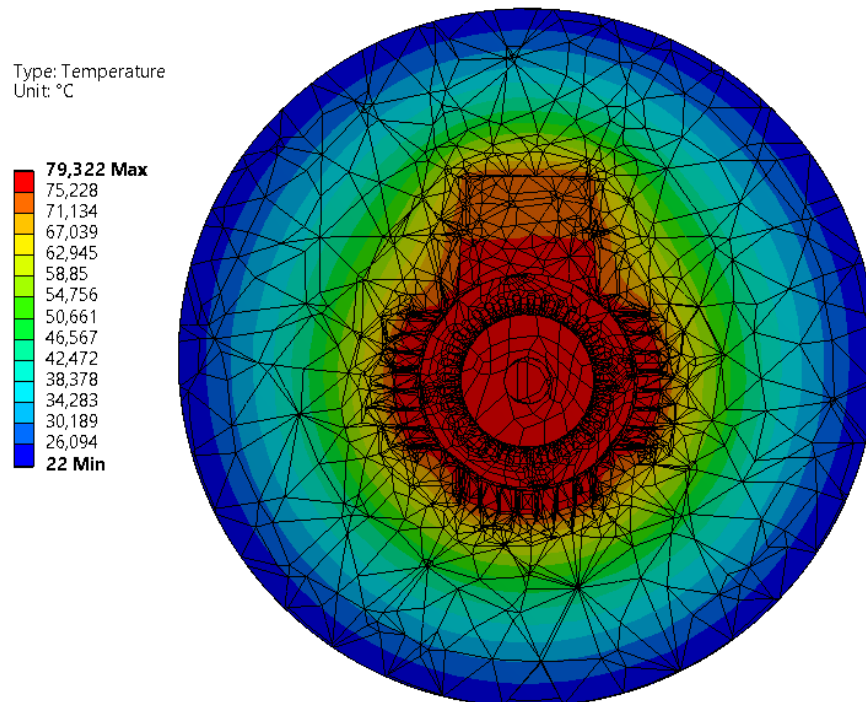
Nastavení této analýzy probíhá stejně jako v případě první teplotní analýzy. Nejdříve je nutno vybrat materiály v „Engineering Data“, poté importovat model v „Geometry“ a následně v „Setup/Model“ přiřadit dílům motoru příslušný materiál.

Závěrem v sekci „Setup“ nastavit teplotu okolního vzduchu na povrch vzduchového obalu, ztráty ve vinutí a statoru motoru, současně i požadované výstupy. Rozdílností je použití dat z analýzy proudění vzduchu okolo motoru. Tyto data se přiřazují ve stromové nabídce pod „Import Load“, kde vybereme možnost „Convection Coefficient“, kterou použijeme na plochu motoru a následně spustíme výpočet.

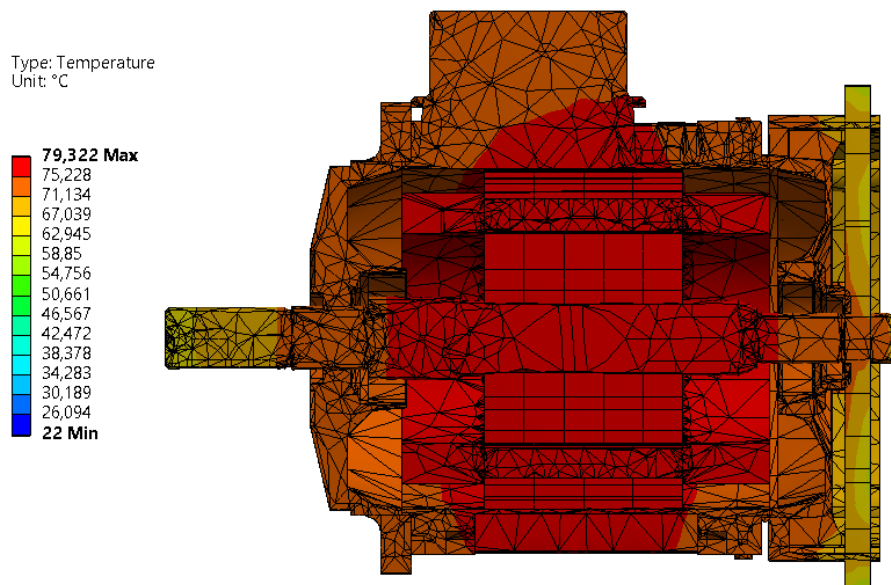
## 10.6.2 Výsledky chlazení motoru



Obr. 10-23: Zobrazení rozložení teploty motoru na řezné rovině boční pohled



Obr. 10-24: Zobrazení rozložení teploty motoru na řezné rovině přední pohled



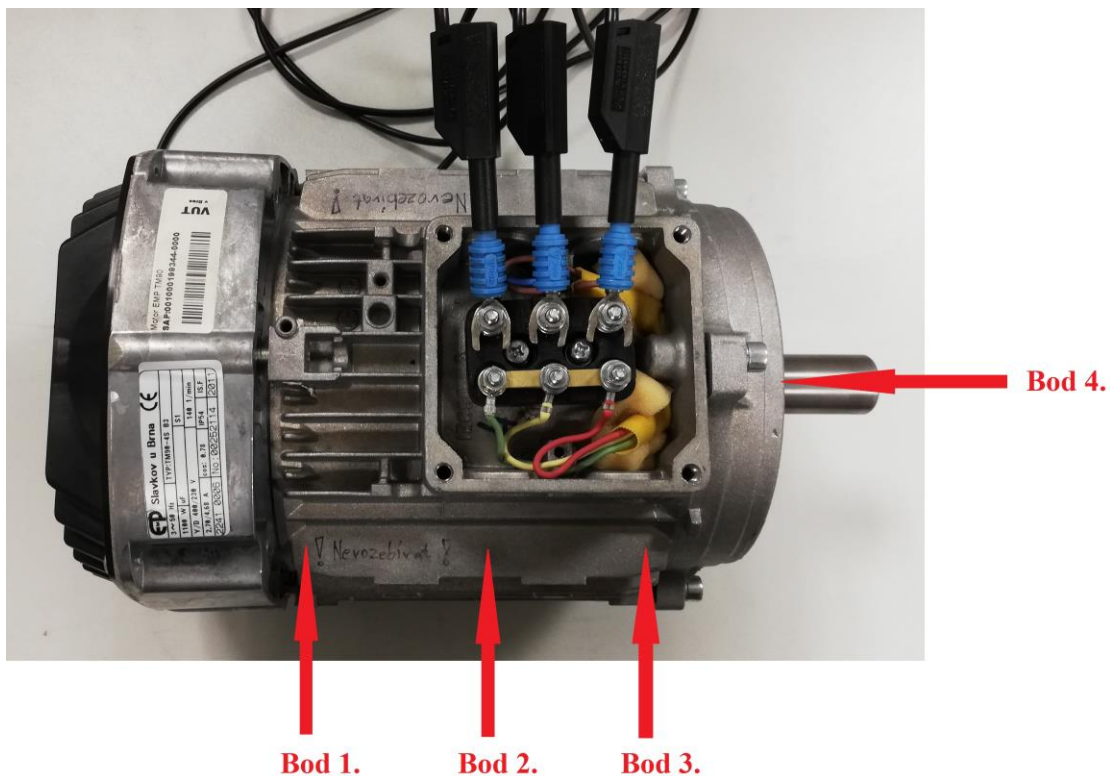
**Obr. 10-25: Zobrazení rozložení teploty motoru boční pohled**

## 10.7 Měření teploty asynchronního motoru

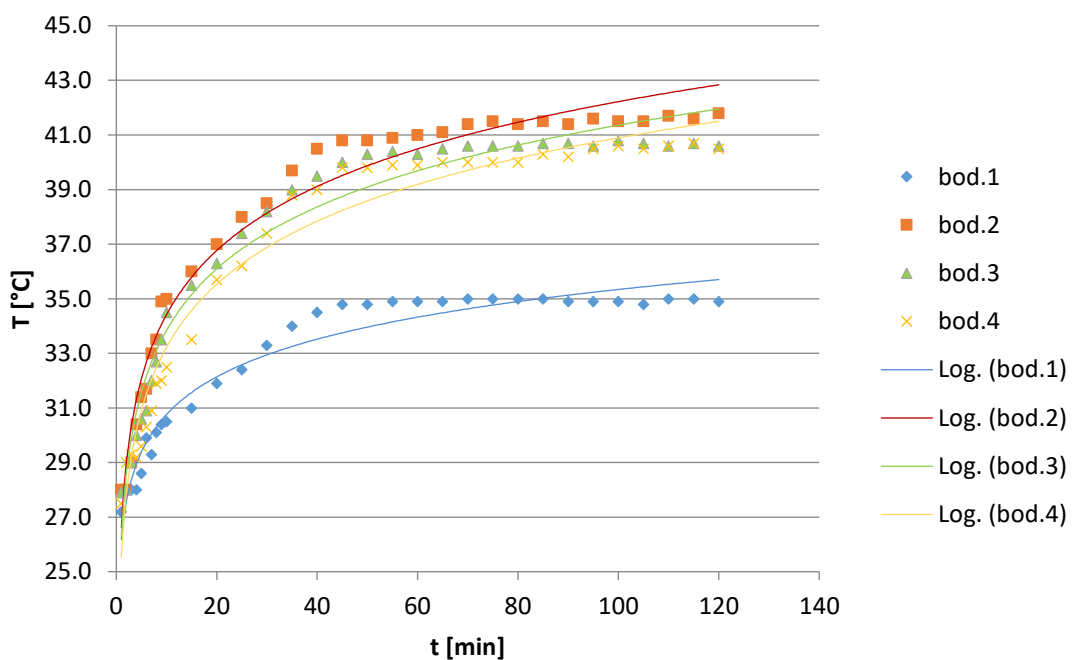
Abychom ověřili správnost výsledků ze simulací za pomoci idealizovaného modelu motoru, bylo provedeno praktické měření. S tímto měřením byly následně porovnávány výsledky ze simulací. Měření bylo provedeno na nezatíženém motoru a následně, zatíženém motoru dynamometrem, pomocí Differential Thermometer Datalogger ND 200 a teplotní sondou s termočládky typu K.

### 10.7.1 Nezatížený asynchronní motor

Motor byl připojen na napájecí napětí 400 V. Naměřené hodnoty na jedné fázi byly, 414 V a 2,8 A. Počáteční teplota v okolí motoru byla 23,2 °C, na konci měření se zvýšila na 25,8 °C. Motor byl v provozu 120 minut, za tuto dobu u něj došlo k ustálení teploty, ta byla měřena na čtyřech místech, prvních 10 minut po minutě, následný čas po 5 minutách. Teplota se po 120 minutách ustálila na průměrné teplotě 39,45 °C. Všechny hodnoty byly měřeny za pomoci diferenčního teploměru s termočládky typu K.



Obr. 10-26: Měřící body na motoru

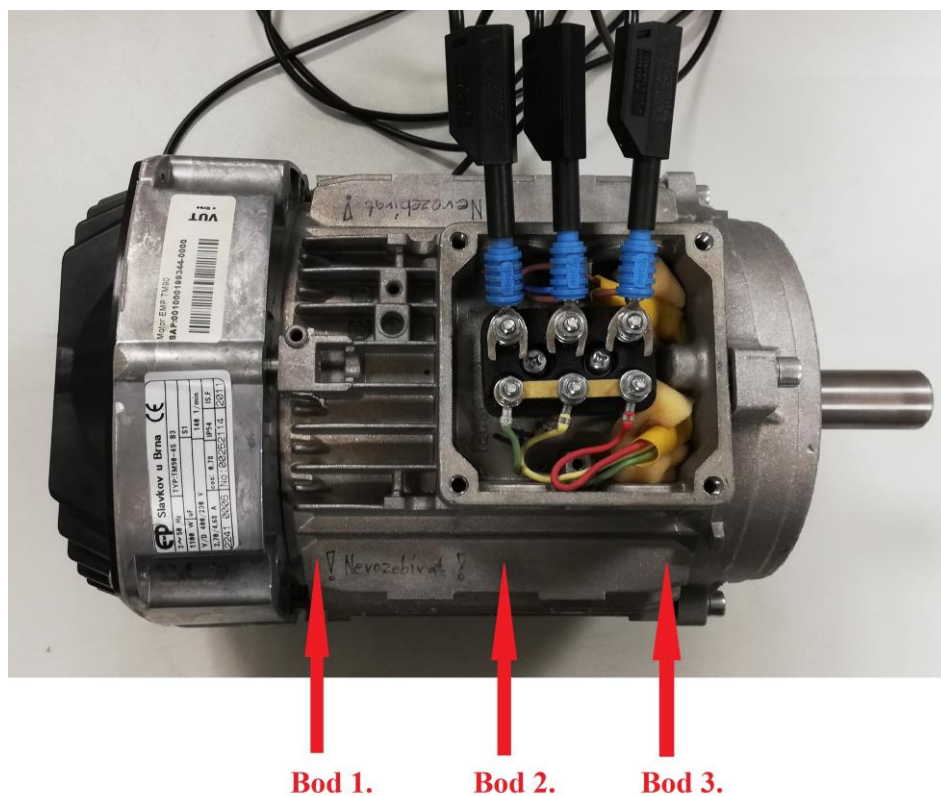


Obr. 10-27: Změřená oteplovací charakteristika nezátíženého motoru

## 10.7.2 Zatížený asynchronní motor

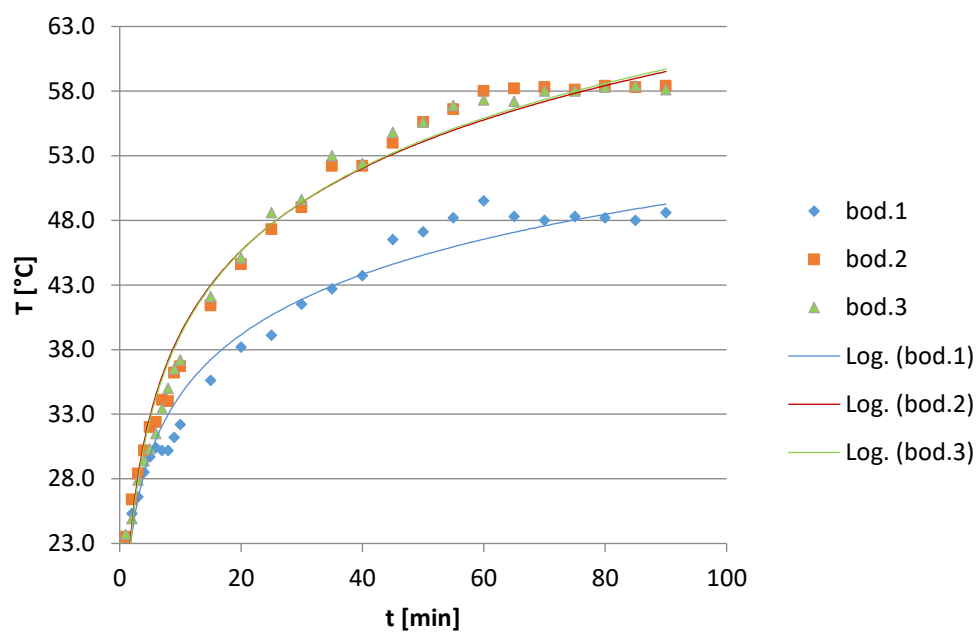
Motor byl připojen na napájecí napětí 400 V a pružnou spojkou spojen s dynamometrem ASD6, 3K-4. Naměřené hodnoty na jedné fázi byly 414 V a 2,8 A. Počáteční teplota v okolí motoru byla 23,4 °C, na konci měření 27,8 °C. Motor byl v provozu 90 minut, za tuto dobu k němu došlo k ustálení teploty, ta byla měřena na stejných místech jako u nezatíženého motoru, avšak jen na třech. Při tomto měření byl použit pro změření teploty i pyrometr Model: XXXMX4PG. Prvních 10 minut po minutě, následný čas po 5 minutách. Po této době se teplota ustálila na průměrné teplotě 55,03 °C podle diferenciálního teploměru a 41,267°C podle pyrometru.

Motor byl v průběhu měření nastaven na otáčky 1417,7 ot/min, moment motoru 8,138 Nm a výkon 1208,17 W.

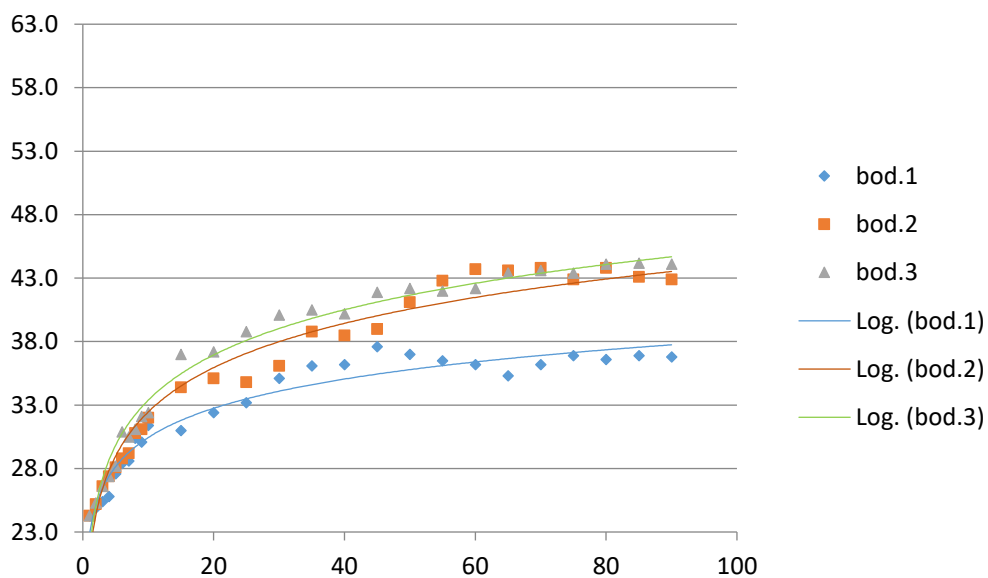


Obr. 10-28: Měřící body pro zatížený motor





**Obr. 10-29: Změřená oteplovací charakteristika zatíženého motoru diferenciálním teploměrem**



**Obr. 10-30: Změřená oteplovací charakteristika zatíženého motoru pyrometrem**

# 11 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo seznámit se s tematikou oteplení elektrických strojů, následně vytvořit 3D model zadaného třífázového asynchronního motoru a podrobit ho teplotním analýzám za pomoci výpočetního programu a reálného měření.

Pro tuto práci byl vybrán třífázový asynchronní motor vyrobený v EMP ve Slavkově u Brna, Typ TM90-4s B3; č. 1, který je ve školní laboratoři pro testování například vzniku vibrací v motoru.

Pro vytvoření 3D modelu motoru byla k dispozici výkresová dokumentace, avšak po zjištění nepřesností vzhledem k fyzickému motoru a nedostatečnému okótování dílu, bylo přistoupeno k fyzickému měření přístupných částí motoru, tak, aby nebylo mechanicky zasáhnuto do motoru.

V neposlední řadě byly 3D modely podrobovány několika simulacím, a to jak ustálené teplotní analýze, kterou byla vypočítána teplota  $98^{\circ}\text{C}$ , tak výpočtu oteplovací křivky, kde byla výsledná hodnota oteplení motoru  $109^{\circ}\text{C}$  a byla získána i oteplovací křivka asynchronního motoru. Hodnoty oteplení se od sebe liší o  $9^{\circ}\text{C}$ , je to způsobeno provedenými zjednodušeními.

Pro konečnou analýzu oteplení motoru s chlazením od ventilátoru bylo dále nutno vytvořit simulaci točícího se ventilátoru, následně data o rychlosti vzduchu použít pro simulaci proudění vzduchu okolo motoru. Z této simulace byla získána data o přestupu tepla z povrchu motoru, která byla použita pro konečnou analýzu chlazeného motoru při chodu s připojenou zátěží a jmenovitými parametry. Výsledná teplota povrchu motoru byla  $71^{\circ}\text{C}$ . Nuceným prouděním od ventilátoru bylo tedy docíleno snížení teploty o  $27^{\circ}\text{C}$ .

Tyto hodnoty mohly být následně porovnávány s reálným měřením oteplení motoru. Samotný motor byl měřen dvěma způsoby, se zátěží a i bez zátěže. Bez připojené zátěže se motor zahřál na průměrnou ustálenou teplotu  $39,45^{\circ}\text{C}$  po 120 minutách. Zatížený motor dosáhl ustálené teploty dříve, už po 90 minutách a byl měřen dvěma metodami, kontaktní a bezkontaktní. Kontaktní metodou byla změřena průměrná teplota  $55,03^{\circ}\text{C}$  a bezkontaktní metodou  $41,27^{\circ}\text{C}$ . Dle očekávání, lze vidět, že bezkontaktní metoda je více nepřesná oproti kontaktní metodě.



Porovnáním reálného měření a analýz, provedených za pomoci výpočetní techniky, bylo zjištěno, že výsledné hodnoty oteplení se liší o 16 °C. Rozdíl v naměřených a vypočítaných hodnotách je způsoben především zjednodušením jak 3D modelu, tak i v následných simulacích. Další nepřesnosti mohly vzniknout u reálného měření, při odečítání teplot. Teplotní čidlo bylo v měřených časech opakovaně přikládáno na měřená místa povrchu motoru, tudíž nebylo pevně umístěno na zvolené plochy, následkem čehož nebyl tedy zajištěn dostatečný kontakt a přesnost měření.

Motor tedy díky chlazení od ventilátoru nepřesáhne maximální hodnotu oteplení, a je za chodu udržován v provozní teplotě.

# Literatura

- [1] ČERMÁK, Jiří. Elektrické točivé stroje: Rozdělení a základní vlastnosti [online]. 25.3.2017 [cit. 2018-10-27]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/elektricke-tocive-stroje-rozdeleni-a-zakladni-vlastnosti/>
- [2] DOC.ING. CHMELÍK, Karel. ASYNCHRONNÍ A SYNCHRONNÍ ELEKTRICKÉ STROJE[online]. 2001, , 135 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <https://homel.vsb.cz/~ber30/stroje/AMaSMstroje.pdf>
- [3] SolidWorks - 3D CAD navrhování [online]. [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <https://www.solidvision.cz/solidworks/>
- [4] Ansys [online]. [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products>
- [5] Mechanický simulační software [online]. [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <https://caeai.com/ansys-software-support/ansys-software/mechanical-simulation-software>
- [6] VÁVRA, Václav a Zdeněk LOSOS. Multimediální studijní texty z mineralogie pro bakalářské studium: základy termodynamiky [online]. Brno, 2006 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: [http://mineralogie.sci.muni.cz/kap\\_6\\_2\\_termodyn/kap\\_6\\_2\\_termodyn.htm#6.2.1](http://mineralogie.sci.muni.cz/kap_6_2_termodyn/kap_6_2_termodyn.htm#6.2.1).
- [7] MGR.SURYNEK, Radek. Tepelná výměna, teplota, teplo [online]. [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: [http://suryblog.cz/?page\\_id=409](http://suryblog.cz/?page_id=409)
- [8] Vnitřní energie. Teplo. Tepelná výměna. [online]. , 10 [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: [https://www.gymck.cz/storage/1327301197\\_sb\\_8b\\_fy\\_vnitri\\_energie\\_teplo.pdf](https://www.gymck.cz/storage/1327301197_sb_8b_fy_vnitri_energie_teplo.pdf)
- [9] BUREŠ, Jiří. [online]. 2002 [cit. 2018-10-30]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/prevody/teplota.htm>
- [10] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. Fyzika Vysokoškolská učebnice obecné fyziky. 1. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1869-9,81-7196-214-7.
- [11] ING.PALLA, Miloš a Miroslav ING.OPL. Ztráty a účinnost [online]. [cit. 2018-11-05]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/781>
- [12] DOC.ING.ONDRŮŠEK, Čestmír. Elektrické stroje: Skriptum VUT.
- [13] VRBA, Martin a Michal VEVERKA. Metoda konečných prvků: Ansys [online]. In: . s. 24 [cit. 2018-11-08]. Dostupné z: [http://www.shigley.cz/images/texts/file/prednaska1\\_mkp.pdf](http://www.shigley.cz/images/texts/file/prednaska1_mkp.pdf)
- [14] Třífázové motory, asynchronní motory [online]. [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: [https://www.sew-eurodrive.cz/vyrobky/motory/trifazove\\_motory/drehstrommotoren\\_1.html](https://www.sew-eurodrive.cz/vyrobky/motory/trifazove_motory/drehstrommotoren_1.html)
- [15] Synchronní a asynchronní motor: Rozdíly, principy, činnosti, aplikace [online]. 2014 [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: <https://cs.erch2014.com/biznes/6310-sinhronnyy-i-asinhronnyy-dvigatel-otlichiya-princip-raboty-primenenie.html>

- [16] *Řez asynchronním motorem s kotvou na krátko* [online]. In: . [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: <https://www.mylms.cz/text-prehled-a-zapojeni-motoru/>
- [17] Svorkovnice [online]. In: . [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/asynchronni-motor/svorkovnice>
- [18] KOPYLOV, Igor Petrovič a kolektiv. *Stavba elektrických strojů*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1988.
- [19] ING. ONDRUŠKA, Emil a Antonín ING. MALOUŠEK. *Ventilace a chlazení elektrických točivých strojů*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1985.
- [20] HAK, Josef a Oldřich OŠLEJŠEK. *Výpočet chlazení elektrických strojů*. 1. Brno: Výzkumný a vývojový ústav elektrických točivých strojů, 1973.
- [21] ING. JANDA, Marcel. *Teplotní optimalizace části elektrických strojů*. 2008, 33. ISSN 1213-4198.
- [22] *Peltierův chladič - princip* [online]. In: . [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://old.spsemoh.cz/vyuka/elz/elz3.htm>

# Seznam symbolů a zkratk

## Zkratky:

## Symbols:

Q	...	Teplo	[J]
c	...	Měrná tepelná kapacita	[J.K <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> ]
m	...	Hmotnost	[kg]
T	...	Počáteční teplota	[K]
T <sub>o</sub>	...	Koncová teplota	[K]
T	...	Teplota	[K]
Pr	...	Výkon	[W]
σ	...	Stefan-Boltzmanova konstanta (5,670310 <sup>-8</sup> )	
[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-4</sup> ]			
T	...	Teplota	[K]
ε	...	Emisivita (0-1)	[-]
S	...	Plocha tělesa	[m <sup>2</sup> ]
η	...	Účinnost	[-]
P <sub>1</sub>	...	Příkon	[W]
P <sub>2</sub>	...	Výkon na hřídeli	[W]
ΔPΣ	...	Celkové ztráty	[W]
ΔP <sub>Fe</sub>	...	Ztráty v železe (mag. obvod)	[W]
ΔP <sub>mech</sub>	...	Ztráty mechanické	[W]
ΔP <sub>J1</sub>	...	Ztráty ve vinutí statoru	[W]
ΔP <sub>J2</sub>	...	Ztráty ve vinutí rotoru	[W]
ΔP <sub>d</sub>	...	Ztráty dodatečné	[W]
ΔP <sub>h</sub>	...	Hysterezní ztráty	[W]
ΔP <sub>d</sub>	...	Ztráty vířivými proudy	[W]
k <sub>h</sub> ;k <sub>v</sub>	...	Koeficienty závislé na materiálu a tloušťce plechů	
[-]			
f	...	Frekvence	[Hz]
B <sub>m</sub>	...	Maximální hodnota mag. indukce	[T]
m	...	Hmotnost magnetického materiálu	[kg]

$m_1$	...	Počet fází vinutí statoru	[-]
$m_2$	...	Počet fází vinutí rotoru	[-]
$R_1$	...	Odpor vinutí statoru	[ $\Omega$ ]
$R_2$	...	Odpor vinutí rotoru	[ $\Omega$ ]
$I_1$	...	Proud vinutím statoru	[A]
$I_2$	...	Proud vinutím rotoru	[A]
CFX	...	Computational Fluid Dynamics	