

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2022

Bc. Daniel Příbyl



# 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

## TEPELNÁ ANALÝZA SERVOMOTORU

THERMAL ANALYSIS OF SERVOMOTOR

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Daniel Příbyl

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Klíma

BRNO 2022

# Diplomová práce

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

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Bc. Daniel Příbyl

**ID:** 203420

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## Tepelná analýza servomotoru

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte teplotní analýzu servomotoru s permanentními magnety.
2. Navrhněte možné způsoby chlazení motoru a vytvořte model stroje s cizím chlazením.
3. Výsledky ověřte praktickým měřením na vybraném vzorku.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PYRHONEN J., JOKINEN T., HRABOVCOVÁ V., Design of Rotating Eletrical Machines. John Wiley and Sons, 2007.
- [2] SAARI J., Thermal Analysis of High-speed Induction Machines. Doctoral thesis, Finland, 1998.
- [3] CENGEL Y., GHAJAR A., Heat and Mass Transfer. Fifth edition. McGraw hill education, 2015.

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 22.5.2022

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Klíma

**doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

### 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**

Práce se zabývá návrhem tepelného modelu servomotoru v programu Motor-CAD a jeho použitím při analýze servomotoru. Na začátku je krátké seznámení se servomotory a jejich částmi, hlavně co se týče tepelného modelu. Dále jsou popsány principy přestupu tepla. V práci je rovněž kapitola věnována samotnému programu Motor-CAD. Na základě změřených oteplovacích zkoušek je poté v programu doladěn tepelný i elektromagnetický model motoru. Následně je navržen způsob cizího chlazení a podle něj je model upraven. Pomocí modelu jsou nalezeny body zatížení motoru pro maximální dovolené oteplení při vodním chlazení. Na konci práce je zhodnocení přínosu vodního chlazení pro servomotor.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Tepelný model, elektromagnetický model, servomotor, Motor-CAD, tepelná síť, vodní chlazení

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the design of the thermal model of servomotor in program Motor-CAD and using it for analyze of servomotor. In the beginning is a short familiarization about its parts, especially important for the thermal model. Further are described principles of heat exchange. There is a chapter, which is dedicated to the program support of the Motor-CAD. Thermal model and electromagnetic model inputs are tuned according to the measured data. Then a way of active cooling is designed and based of it the model in program is edited. Using the model is found the points of load of the motor for maximum allowable temperature with water cooling. In the conclusion is a valorization of benefit of water cooling for the servomotor.

## **KEYWORDS**

Thermal model, electromagnetic model, servomotor, Motor-CAD, thermal network, water cooling

PŘIBYL, Daniel. *Tepelná analýza servomotoru*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142719>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. 80 s. Vedoucí práce: Ing. Petr Klíma.

## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení autora:** Bc. Daniel Příbyl  
**VUT ID autora:** 203420  
**Typ práce:** Diplomová práce  
**Akademický rok:** 2021/22  
**Téma závěrečné práce:** Tepelná analýza servomotoru

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Petru Klímovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Dále bych rád poděkoval panu Ing. Štěpánovi Chvatíkovi, u něhož si velice cením jeho pomoci s programem Motor-CAD a jeho cenných rad a podnětných návrhů k práci.

Své poděkování bych rovněž rád vyjádřil Ing. Jiřímu Duroňovi Ph.D., kterému děkuji za jeho cenné rady a podnětné návrhy k práci.

# Obsah

Úvod	13
<b>1 Seznámení se servomotory</b>	<b>14</b>
1.1 Využití	15
1.2 Kritické části motoru z hlediska dovoleného oteplení	16
1.2.1 Vinutí	16
1.2.2 Permanentní magnety	16
1.2.3 Zpětnovazební člen	18
1.2.4 Ložiska a hřídelové těsnění	18
1.2.5 Parkovací brzda	18
1.3 Teplotní snímače a jejich funkce	19
1.3.1 Lineární	19
1.3.2 Nelineární	20
<b>2 Přestupy tepla</b>	<b>22</b>
2.1 Přestup tepla vedením	22
2.2 Přestup tepla prouděním	23
2.3 Přestup tepla zářením	23
<b>3 Programová podpora Motor-CAD</b>	<b>25</b>
3.1 Zadávání geometrie	25
3.2 Nastavení materiálů a knihovny	27
3.3 Elektromagnetický model	27
3.3.1 Návrh vinutí	27
3.3.2 Analýza	29
3.4 Tepelný model	31
3.4.1 Chlazení a ztráty	31
3.4.2 Schématické zobrazení tepelné sítě	33
3.4.3 Sledování oteplení na jednotlivých částech motoru	35
<b>4 Měření jmenovitého oteplení zvoleného motoru</b>	<b>36</b>
4.1 Oteplení od parkovací brzdy	36
4.2 Oteplení od zpětnovazebního členu	37
4.3 Oteplovací zkouška	38
4.3.1 Při 200 ot./min	38
4.3.2 Při 6000 ot./min	39
4.3.3 Při 4000 ot./min	40

<b>5</b>	<b>Elektromagneticko – tepelný výpočet</b>	<b>41</b>
5.1	Elektromagnetický model v Motor-CAD . . . . .	41
5.1.1	Geometrie . . . . .	41
5.1.2	Materiály . . . . .	42
5.1.3	Výpočet . . . . .	43
5.2	Tepelný model v MotorCADu . . . . .	44
5.2.1	Geometrie . . . . .	44
5.2.2	Chlazení . . . . .	45
5.2.3	Ztráty . . . . .	45
5.2.4	Úprava schématu tepelné sítě . . . . .	46
5.3	Ladění tepelného modelu dle změřených hodnot . . . . .	49
5.3.1	Výpočet pro 200 ot./min . . . . .	49
5.3.2	Výpočet pro 6000 ot./min . . . . .	50
5.3.3	Výpočet pro 4000 ot./min . . . . .	52
5.3.4	Kontrola pro 200 ot./min . . . . .	53
5.4	Zhodnocení výsledků měření a srovnání s výpočtem . . . . .	54
<b>6</b>	<b>Návrh cizího chlazení pro servomotor</b>	<b>56</b>
6.1	Možnosti cizího chlazení . . . . .	56
6.1.1	Ventilátor . . . . .	56
6.1.2	Kanátky pro vodní chlazení . . . . .	56
6.1.3	Vodní chlazení povrchu motoru . . . . .	56
6.1.4	Chladicí deska s vodním chlazením . . . . .	57
6.2	Návrh pracoviště se zvoleným způsobem chlazení . . . . .	57
<b>7</b>	<b>Výpočet a měření pro cizí chlazení</b>	<b>58</b>
7.1	Prvotní výpočet tepelného modelu s cizím chlazením . . . . .	58
7.1.1	Výpočet pro 200 ot./min . . . . .	60
7.1.2	Výpočet pro 6000 ot./min . . . . .	61
7.1.3	Srovnání vypočtených hodnot se změřenými . . . . .	62
7.2	Výpočet pro maximální dovolené oteplení při cizím chlazení . . . . .	64
7.2.1	Výpočet pro 200 ot./min . . . . .	64
7.2.2	Výpočet pro 6000 ot./min . . . . .	65
7.2.3	Srovnání vypočtených hodnot se změřenými . . . . .	66
7.3	Studie pro různý průtok kapaliny chladicí deskou . . . . .	69
<b>8</b>	<b>Vyhodnocení přínosu cizího chlazení</b>	<b>71</b>
8.1	Elektromagnetické srovnání . . . . .	71
8.2	Teplotní srovnání . . . . .	72

<b>Závěr</b>	<b>74</b>
<b>Literatura</b>	<b>76</b>
<b>Seznam symbolů a zkratk</b>	<b>78</b>

# Seznam obrázků

1.1	Servomotor [1] . . . . .	14
1.2	Soustředěné dvouvrstvé vinutí . . . . .	14
1.3	Rotor s magnety na povrchu . . . . .	15
1.4	Robotický operační sál se servomotory [1] . . . . .	15
1.5	Srovnání demagnetizačních křivek magnetů [3] . . . . .	17
1.6	Demagnetizační charakteristika magnetu N45H [5] . . . . .	17
1.7	Encoder Heidenhain [7] . . . . .	18
1.8	Elektromagnetická brzda [10] . . . . .	19
1.9	Závislost odporu Pt100 a Pt1000 na teplotě . . . . .	20
1.10	Závislost odporu (a) NTC na teplotě (b) čtyř různých PTC od firmy EPCOS na teplotě [12] . . . . .	21
2.1	Přestupy tepla [13] . . . . .	22
2.2	Přestupy tepla vedením [13] . . . . .	23
2.3	Přestupy tepla prouděním a zářením [13] . . . . .	24
3.1	Radiální geometrie . . . . .	25
3.2	Axiální geometrie . . . . .	26
3.3	Geometrie 3D . . . . .	26
3.4	Knihovna materiálů . . . . .	27
3.5	Rozložení vinutí v drážce a návrh drátu vinutí . . . . .	28
3.6	Návrh typu a rozložení vinutí . . . . .	28
3.7	Nastavení analýzy . . . . .	29
3.8	Rozložení magnetické indukce na 2D modelu . . . . .	30
3.9	Nastavení (a) chlazení motoru (b) ztrát motoru . . . . .	31
3.10	Nastavení tepelných přestupů kondukcí . . . . .	32
3.11	Nastavení tepelných přestupů radiací . . . . .	32
3.12	Nastavení tepelných přestupů konvekcí . . . . .	33
3.13	Tepelná síť motoru – přehled . . . . .	33
3.14	Tepelná síť motoru – detail . . . . .	34
3.15	Radiální model s názvy tepelných bodů . . . . .	35
3.16	Axiální model s názvy tepelných bodů . . . . .	35
4.1	Graf průběhu oteplení od parkovací brzdy . . . . .	36
4.2	Graf průběhu oteplení od zpětnovazebního členu . . . . .	37
4.3	Graf průběhu oteplení při 200 ot./min . . . . .	38
4.4	Graf průběhu oteplení při 6000 ot./min . . . . .	39
4.5	Graf průběhu oteplení při 4000 ot./min . . . . .	40
5.1	Radiální geometrie pro elektromagnetický model . . . . .	41
5.2	Axiální geometrie pro elektromagnetický model . . . . .	42

5.3	Parametry materiálu pro plechy statoru . . . . .	42
5.4	Parametry materiálu magnetů . . . . .	43
5.5	Nastavení elektromagnetické analýzy . . . . .	44
5.6	Průběh ztrát naprázdno . . . . .	45
5.7	Hodnoty tepelných veličin upravovaných ve schématu . . . . .	47
5.8	Detail části tepelné sítě . . . . .	48
5.9	Sledované teploty (a) axiální zobrazení (b) radiální zobrazení . . . . .	49
5.10	Sledované teploty (a) axiální zobrazení (b) radiální zobrazení . . . . .	50
5.11	Sledované teploty (a) axiální zobrazení (b) radiální zobrazení . . . . .	51
5.12	Sledované teploty (a) axiální zobrazení (b) radiální zobrazení . . . . .	52
5.13	Sledované teploty (a) axiální zobrazení (b) radiální zobrazení . . . . .	53
6.1	Schématické zobrazení okruhu vodního chlazení . . . . .	57
7.1	Průběh ztrát naprázdno za studeného stavu . . . . .	58
7.2	Upravená geometrie s vodou chlazenou chladicí deskou . . . . .	59
7.3	Úprava tepelné sítě pro vodou chlazenou chladicí deskou . . . . .	59
7.4	Sledované teploty (a) axiální zobrazení (b) radiální zobrazení . . . . .	60
7.5	Sledované teploty (a) axiální zobrazení (b) radiální zobrazení . . . . .	61
7.6	Snímek z termokamery se značkou v bodě měření teploty povrchu motoru (a) původní deska (b) vodou chlazená deska . . . . .	62
7.7	Snímek z termokamery se značkou v bodě měření teploty povrchu motoru (a) původní deska (b) vodou chlazená deska . . . . .	63
7.8	Sledované teploty (a) axiální zobrazení (b) radiální zobrazení . . . . .	64
7.9	Sledované teploty (a) axiální zobrazení (b) radiální zobrazení . . . . .	65
7.10	Snímek z termokamery se značkou v bodě měření teploty povrchu motoru . . . . .	66
7.11	(a) Snímek z termokamery (b) rozložení teploty na úsečce . . . . .	67
7.12	Snímek z termokamery se značkou v bodě měření teploty povrchu motoru . . . . .	68
7.13	(a) Snímek z termokamery (b) rozložení teploty na úsečce . . . . .	68
7.14	Závislost dosažitelného momentu a účinnosti na průtoku . . . . .	69
7.15	Závislost dosažitelného výkonu a účinníku na průtoku . . . . .	70
8.1	Závislost momentu na otáčkách motoru pro různá chlazení . . . . .	71
8.2	Závislost odvedených tepelných ztrát do vody na průtoku . . . . .	72

# Seznam tabulek

1.1	Typy neodymových magnetů pro různé provozní teploty [4] . . . . .	16
4.1	Teploty částí po oteplovací zkoušce od parkovací brzdy . . . . .	37
4.2	Teploty částí po oteplovací zkoušce od zpětnovazebního členu . . . . .	37
4.3	Teploty částí po oteplovací zkoušce 200 ot./min . . . . .	39
4.4	Teploty částí po oteplovací zkoušce 6000 ot./min . . . . .	39
4.5	Teploty částí po oteplovací zkoušce 4000 ot./min . . . . .	40
5.1	Parametry materiálu vinutí . . . . .	43
5.2	Legenda pro tepelné schéma . . . . .	46
5.3	Legenda zmíněných tepelných veličin pro obr. 5.7 . . . . .	47
5.4	Srovnání výsledných teplot 200 ot./min . . . . .	54
5.5	Srovnání výsledných teplot 4000 ot./min . . . . .	54
5.6	Srovnání výsledných teplot 6000 ot./min . . . . .	55
7.1	Srovnání výsledků analýzy pro přirozené a cizí chlazení . . . . .	60
7.2	Srovnání výsledků analýzy pro přirozené a cizí chlazení . . . . .	61
7.3	Srovnání výsledků 200 ot./min . . . . .	62
7.4	Srovnání výsledků 6000 ot./min . . . . .	63
7.5	Srovnání výsledků 200 ot./min . . . . .	66
7.6	Srovnání výsledků 6000 ot./min . . . . .	67
7.7	Srovnání parametrů motoru v závislosti na chlazení . . . . .	70
8.1	Srovnání dosažitelného momentu na hřídeli v závislosti na chlazení . .	71
8.2	Srovnání odvedených tepelných ztrát do chladicí vody při 6000 ot./min	72
8.3	Srovnání Jouleových ztrát ve vinutí při 6000 ot./min . . . . .	73

# Úvod

Nejčastější typ servomotoru je synchronní stroj s permanentními magnety, který nachází své využití v mnoha aplikacích. Specifické využití servomotorů je v automatizačním průmyslu. Jedná se o využití v robotických ramenech, využití pro medicínské a laboratorní automatizace.[1][2] Pro tyto aplikace servomotorů je společný druh provozování pohonu a možnost víceúčelového využití. Ve většina aplikací, kde se servomotory využívají, nepracují servomotory v kontinuálním provozu, nýbrž provozu přerušovaném. Navíc v tomto provozu nebývají zatěžovány stále stejným momentem a doba chodu a klidová doba se může stále měnit. Všechny tyto aspekty pak dělají správné nadimenzování servomotoru pro danou aplikaci náročnější. Štítkové parametry jsou proto udávány pro maximální oteplení při kontinuálním zatížení i přesto, že ve většině případů nebývá servomotor tímto způsobem provozován. Z tohoto důvodu se snaží firmy dodávat k jmenovitým parametrů v režimu chodu S1, také jmenovité parametry v režimu chodu S3.

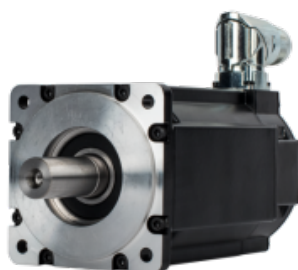
Dnešním cílem firem je nabídnout zákazníkovi nejlepší poměr mezi velikostí motoru a dosažitelným momentem. Vyššího momentu u servomotorů lze dosáhnout jeho krátkodobým přetěžováním, je však nutno zvolit vhodné zatížení a čas jeho působení tak, aby nedošlo k nadlimitnímu oteplení kritických částí motoru. Možností pro dosažení vyššího momentu při kontinuálním chodu a tedy i v krátkodobém je zlepšení chlazení těchto kritických částí.

Cílem této práce je vytvořit tepelný model servomotoru na základě jeho změřených oteplovacích křivek při různých výkonech v kontinuálním chodu. Tento model je posléze v práci použit pro výchozí výpočet při cizím chlazení. Následně jsou nalezeny dva body provozování motoru pro maximální dovolené oteplení při tomto cizím chlazení a na konci práce se nachází zhodnocení přínosu tohoto chlazení na parametry motoru.

# 1 Seznámení se servomotory

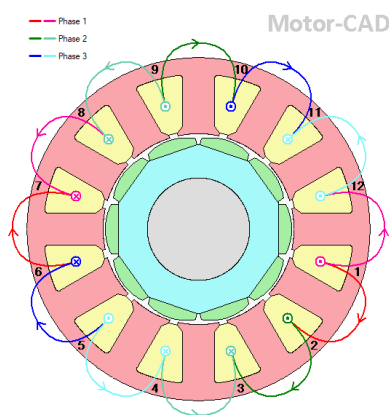
Označení servomotor nevyjadřuje typ stroje z hlediska návrhu jako např. DC motor nebo asynchronní, ale vychází z latinského servus, což doslova znamená otrok. V duchu tohoto označení se nese využití těchto pohonů. Servomotory z hlediska principu funkčnosti jsou EC motory nebo vektorově řízené synchronní (asynchronní) motory.[1]

V této práci bude popisován synchronní servomotor využívající topologii s permanentními magnety (PMSM) viz obr. 1.1. Tato konstrukce má výhody ve vyšší účinnosti a momentové zatížitelnosti na hřídeli.



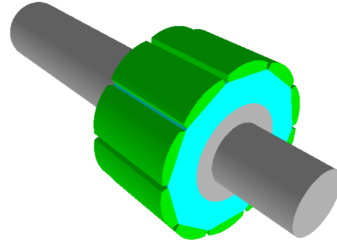
Obr. 1.1: Servomotor [1]

Statorové vinutí je nejčastěji navíjeno jako soustředěné jednovrstvé/dvouvrstvé (obr. 1.2) a to z důvodu mnohem kratších čel vinutí, která se nepřekrývají, což má pozitivní vliv na ztráty ve vinutí motoru, a tedy i na jeho celkovou účinnost. Další podstatnou výhodou, vyplývající z kratší délky čel vinutí, je zkrácení délky samotného motoru. Jelikož se jedná o motory, u kterých je kladen důraz na přesnou polohu a hladký chod, tak se využívají vícepólové motory,  $2p = 8, 10, 12 \dots$



Obr. 1.2: Soustředěné dvouvrstvé vinutí

Rotor je řešen jako standardní PMSM, většinou s magnety na povrchu viz obr. 1.3. Takto umístěné magnety neovlivní indukčnost ( $L_d = L_q$ ) a motor díky tomu působí jako synchronní stroj s hladkým rotorem. Magnety jsou na povrch rotoru lepeny a pro lepší upevnění mohou být omotány bandáží.



Obr. 1.3: Rotor s magnety na povrchu

## 1.1 Využití

Servomotory, jak už bylo zmíněno, se používají v aplikacích, kde je dbán důraz na polohu a hladký chod. Takovými případy jsou například robotická ramena nebo přesné posuvy. Tato poloha je sledována zpětnovazebním členem, který je spojený s hřídelí. Tento člen je také důležitý pro celý chod jakéhokoliv PMSM, jelikož pro řízení statorových proudů je nutné znát polohu rotoru (jde o polohu magnetů vůči statoru). Využití není nutné hledat jen v průmyslu nýbrž díky jejich přesnému definování polohy je můžeme nalézt třeba na operačním sále.[1][2]



Obr. 1.4: Robotický operační sál se servomotory [1]

## 1.2 Kritické části motoru z hlediska dovoleného oteplení

Z hlediska maximálního dovoleného oteplení jsou sledovány tyto kritické části motoru:

- vinutí, jehož maximální dovolené oteplení je stanoveno použitou třídou izolace
- permanentní magnety, kvůli ochraně před nevratnou demagnetizací
- zpětnovazební člen
- ložiska
- parkovací brzda

### 1.2.1 Vinutí

Vinutí je z hlediska oteplení nejkritičtější částí celého motoru. Je zahříváno vlastními Jouleovými ztrátami a ztrátami v železe generovanými ve statorovém svazku. Samotná měď není kritickou částí na dovolené oteplení, ale drát, z kterého je vinutí navíjeno, je izolovaný a tato izolace má podle své třídy dovolené maximální oteplení. Nejpoužívanější třídou izolace je F, která má maximální dovolené oteplení 115 K při 40 °C. Maximální trvalá provozní teplota této třídy izolace je 155 °C. Při vyšších teplotách se zkracuje její životnost.

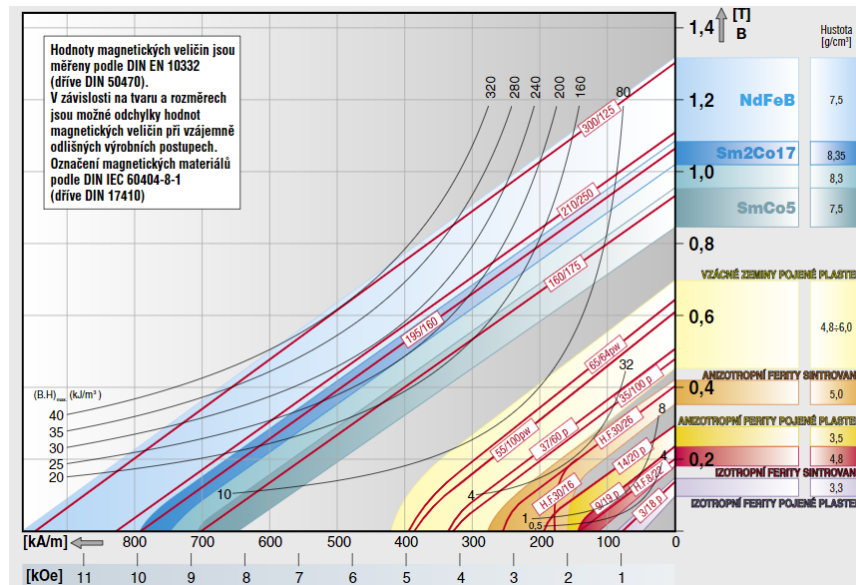
### 1.2.2 Permanentní magnety

Jako materiály na permanentní magnety se používají především vzácné zeminy. V dnešní době se magnety dělají buď ze SmCo (Samarium–Kobalt) nebo z NdFeB (Neodym–Železo–Bor). Jejich přednostmi jsou velká koercitivní síla a vysoká remanentní indukce, srovnání magnetů viz obr. 1.5. Bohužel tyto parametry s rostoucí teplotou klesají a magnety se stávají náchylnějšími k demagnetizaci.

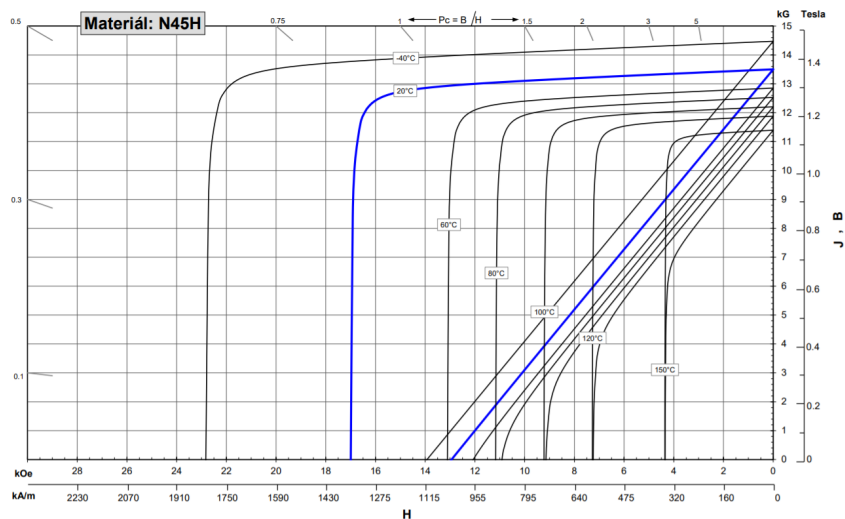
Tab. 1.1: Typy neodymových magnetů pro různé provozní teploty [4]

Teplotní typ	Maximální provozní teplota [°C]	Curieova teplota [°C]
–	80	310
M	100	340
H	120	340
SH	150	340
UH	180	350
EH	200	350
AH	230	350

Tato teplotní závislost je větším problémem u NdFeB, jelikož permanentní magnety SmCo jsou odolnější vůči vyšším teplotám. Neodymové magnety se vyznačují vyšší remanentní indukčí a koercitivní silou, ale mají menší maximální provozní teplotu. Aby bylo možné provozovat neodymové magnety při vyšších teplotách, je třeba využít magnety vyšších teplotních tříd. Tyto magnety nesou označení za vzorkem viz tab. 1.1.



Obr. 1.5: Srovnání demagnetizačních křivek magnetů [3]



Obr. 1.6: Demagnetizační charakteristika magnetu N45H [5]

Na obr. 1.6 je vidět jak klesají magnetické parametry magnetu N45H s rostoucí teplotou.

### 1.2.3 Zpětnovazební člen

Zpětnovazební člen u servomotorů má velmi důležitou roli. Bez jeho použití by nebyla známa poloha rotoru vzhledem k statoru a nebylo by možné správně řídit statorové proudy. Jeho funkce u servomotoru je o to více důležitá, když se jedná o pohony s důrazem na polohu.

Teplotní omezení u těchto zařízení se liší podle jejich typu. Prvním typem je resolver, u něhož je maximální oteplení omezeno tepelnou třídou izolace jeho vinutí (standardně F).[6] Druhým typem zpětnovazebních členů jsou tzv. chytrá zpětnovazební zařízení, která obsahují elektroniku. U těchto typů je maximální provozní teplota omezena právě kvůli elektronice nejčastěji na 100 °C až 125 °C.[7]



Obr. 1.7: Encoder Heidenhain [7]

### 1.2.4 Ložiska a hřídelové těsnění

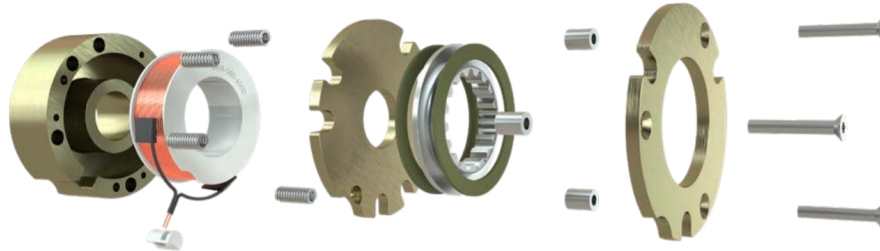
Ložiska slouží jako podpěry hřídele umožňující její rotační pohyb. Z hlediska tepelných ztrát jsou zdrojem, jehož výkon je závislý na otáčkách. Teplotní limity jsou u ložisek řešeny pro lubrikant, těsnění i pro samotné ložiskové kuličky.[8]

Hřídelové těsnění je prvek, který je určený pro utěsnění točících se hřídelí a dalších strojních součástí. Jeho úkolem je zadržet pronikání maziva z pracovního prostoru a zároveň zabránit pronikání nečistot zvenčí. Jelikož je snaha zabránit sebemenšímu úniku maziva či vniku nečistot, tak je nevyhnutelný kontakt s otáčející se hřídelí. Což má za následek další ztráty generující teplo třením. Z hlediska oteplení jsou limitovány použitým materiálem.[9]

### 1.2.5 Parkovací brzda

Nejpoužívanějším druhem parkovací brzdy je brzda pracující na elektromagnetickém principu. Parkovací brzda má za funkci zablokování hřídele motoru v klidovém režimu. Tato funkce je bezpečností a proto funguje za stavu, kdy na cívku elektromagnetické brzdy není přivedeno žádné napětí. Pro odbrzdění brzdy je nutné nabudit její cívku, která tak začne generovat tepelné ztráty, které se přenáší na motor. Navíc

dochází vlivem volnosti pohybu brzdného kotouče k náhodnému tření při chodu, což způsobuje další ztráty. Z hlediska oteplení motoru brzda generuje teplo jak za nulových otáček stálým výkonem v otevřeném stavu, tak i ztráty, které jsou na otáčkách motoru závislé. Mechanismus brzdy lze vidět na obr. 1.8.



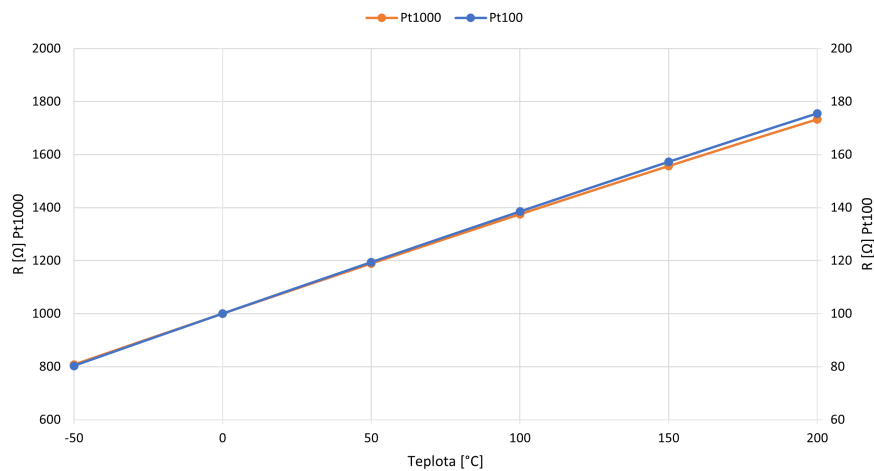
Obr. 1.8: Elektromagnetická brzda [10]

## 1.3 Teplotní snímače a jejich funkce

Teplotní snímač v servomotoru není nutné zařízení, avšak pokud je v konstrukci umístěn může plnit důležitou funkci. Většinou když je v motoru z výroby umístěn teplotní snímač, tak má funkci ochrannou. Díky tomu, že je motor napojený a řízený ze zařízení pro řízení pohonu, tak může na základě informace (o příliš vysoké teplotě) z teplotního snímače dojít k odpojení od napájení. Teplotní snímače se dělí do dvou kategorií, lineární a nelineární snímače.

### 1.3.1 Lineární

Jak už název napovídá, lineární teplotní snímače se vyznačují lineární závislostí výstupní veličiny (odporu) na teplotě. Do této skupiny patří termistory skupiny Pt. Jedná se o platinové termistory, které mají odpor definovaný při 0 °C, jehož hodnotu značí číslice za značkou platiny (Pt100, Pt1000). Jejich výhodou je přesnost, lineární průběh a teplotní rozsah.



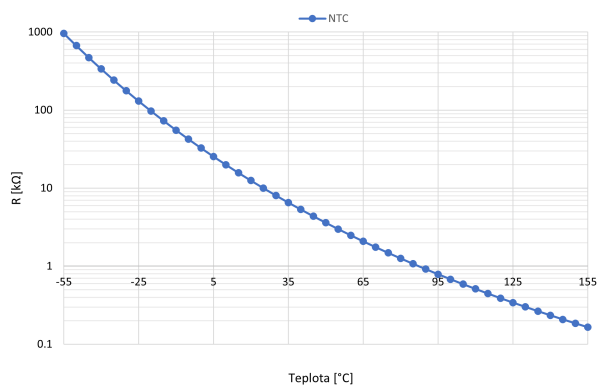
Obr. 1.9: Závislost odporu Pt100 a Pt1000 na teplotě

### 1.3.2 Nelineární

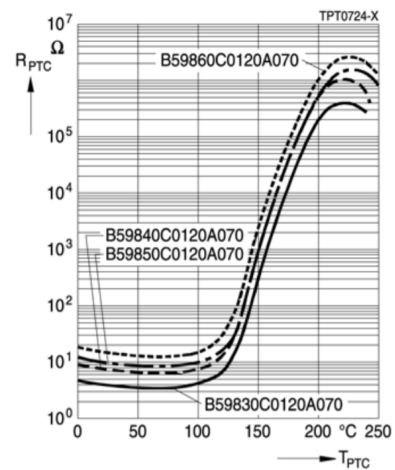
Nelineární charakteristika těchto snímačů může být použita i jako výhoda. Například typ NTC nachází využití v měření malých nebo rychlých změn teploty. NTC neboli negastor má záporný tepelný součinitel a jeho odpor s rostoucí teplotou klesá. Jeho výhodou je dostupnost a příznivá cena. Nevýhodou je, že neumožňuje ochranou funkci pro motor.[11]

Dalším typem je PTC, který má teplotní součinitel kladný. Jeho zvláštností je, že odpor do určité teploty klesá a poté při překročení Curieovy teploty začne strmě stoupat viz obr. 1.10(b). PTC lze využít pro měření ve velmi úzkém teplotním pásmu nebo jako signalizaci překročení určité teploty. Avšak jeho častější využití je v aplikacích, kde se využívá ohřívání termistoru procházejícím proudem. Touto aplikací je například vratná pojistka, kdy se PTC termistor od určitého průchozího proudu zahřeje natolik, až dojde k velmi strmému nárůstu jeho odporu a poklesu průchozího proudu.[11]

Posledním typem jsou polovodičové snímače. Jejich teplotní součinitel je kladný a odpor tedy roste s teplotou. Hodnota teplotního součinitele je mnohem vyšší než u platinových teplotních snímačů. Jejich výhodou je dlouhodobá stabilita, linearita oproti NTC a příznivá cena. Charakteristika není úplně lineární, ale vhodnou metodou se dá tato nelinearita korigovat. Po této korekci se mohou rovnat s lineární charakteristikou platinových snímačů. Řady vyráběných polovodičových snímačů nesou označení KT a KTY.[11] Používaným typy byly KTY 85-110 a KTY 84-130, nicméně se již nevyrábí a kopie těchto snímačů nejsou shodné.



(a)



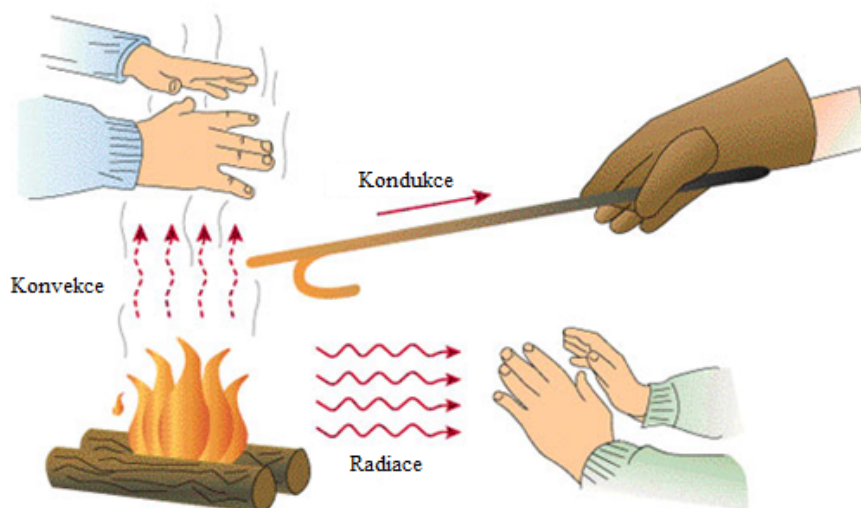
(b)

Obr. 1.10: Závislost odporu (a) NTC na teplotě (b) čtyř různých PTC od firmy EPCOS na teplotě [12]

## 2 Přestupy tepla

Na základě fyzikálních znalostí rozlišujeme celkem tři mechanismy přenosu tepla:

- vedení (konduktce)
- proudění (konvekce)
- záření (radiace)



Obr. 2.1: Přestupy tepla [13]

Tyto přenosy nám umožňují odvádět teplo, které bylo vygenerované ztrátami ve stroji, do okolí.

### 2.1 Přestup tepla vedením

Přestup tepla vedením probíhá zejména v pevných látkách. Teplo je šířeno mezi částmi, které mají rozdílnou teplotu.

Jak je vidět na obr. 2.2, tak teplo se šíří z teplejšího místa směrem k chladnějšímu. Teploty  $T_{w1}$  a  $T_{w2}$  představují rozdílné teploty stěn kvádru,  $S$  je plocha přes kterou se teplo šíří,  $\lambda$  je měrná tepelná vodivost a  $\delta$  je vzdálenost mezi stěnami s různou teplotou. Celkové teplo, které projde mezi stěnami, popisuje Fourierův zákon.[13]

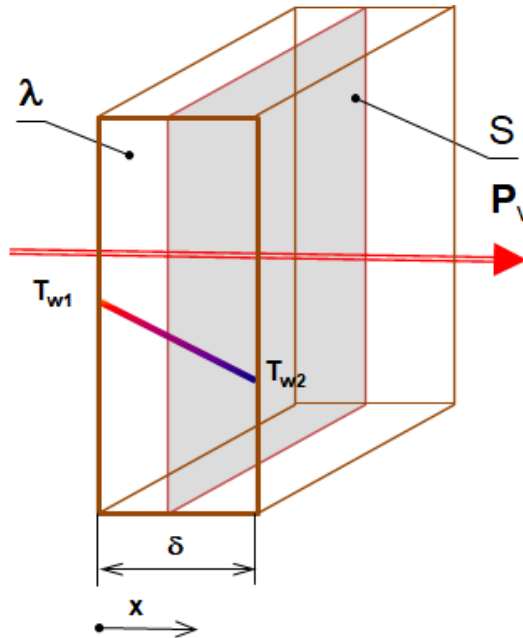
$$P_v = -\lambda S \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Pro příklad popisující na obr. 2.2, lze derivaci teploty v závislosti na ploše přepsat následovně.

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_{w2} - T_{w1}}{\delta} \quad (2.2)$$

Po dosazení do rov. 2.1 je teplo přenesené vedením vyjádřeno viz rov. 2.3

$$P_v = \frac{\lambda}{\delta} S \Delta(T_{w1} - T_{w2}) \quad (2.3)$$



Obr. 2.2: Přestupy tepla vedením [13]

## 2.2 Přestup tepla prouděním

Přenos tepla prouděním je možný pouze v tekutinách. Proudění tepla může probíhat přirozeně nebo může být nucené. Tepelný tok tohoto přenosu je závislý na ploše dotyku, rozdílu teplot a součiniteli přestupu tepla viz rov. 2.4.

$$P_k = \alpha_{\vartheta} S (T_w - T_a) \quad (2.4)$$

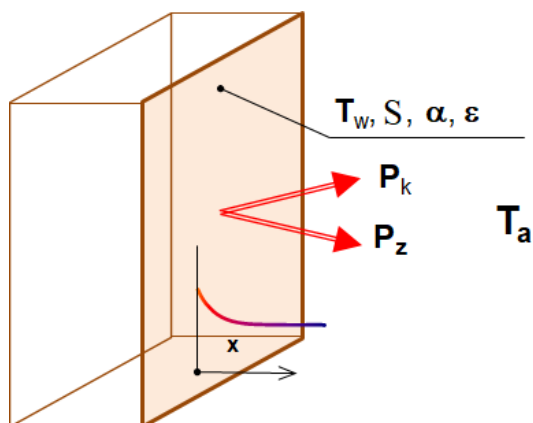
Součinitel přestupu tepla  $\alpha_{\vartheta}$  je materiálová vlastnost, která vyjadřuje kolik tepla ve Watech je možné odvést z jednotkové plochy při oteplení o 1 K.[13]

## 2.3 Přestup tepla zářením

Princip přenosu tepla vyzařováním je fyzikální proces, při kterém dochází přenosu energie ve formě elektromagnetického záření. Díky tomu může docházet k přenosu tepla i ve vakuu. Množství tepla přeneseného pomocí radiace je závislé na teplotě tělesa, emisivitě povrchu a ploše viz rov. 2.5.

$$P_z = \varepsilon \sigma S (T_w^4 - T_a^4), \quad (2.5)$$

kde  $\sigma$  je Steffan-Boltzmanova konstanta, která vyjadřuje úměru mezi zářivým výkonem jednotkové plochy absolutně černého tělesa a čtvrtou mocninou teploty.  $\varepsilon$  emisivita je vlastnost povrchu a je závislá na jeho barvě. Nejvyšší možné emisivity je možné dosáhnout při černé barvě povrchu, naopak nejnižší emisivitu mají lesklé a světlé povrchy. Při výpočtu je nutné dbát na to aby teploty  $T_w$  a  $T_a$  byly dosazeny v Kelvinech.[13]



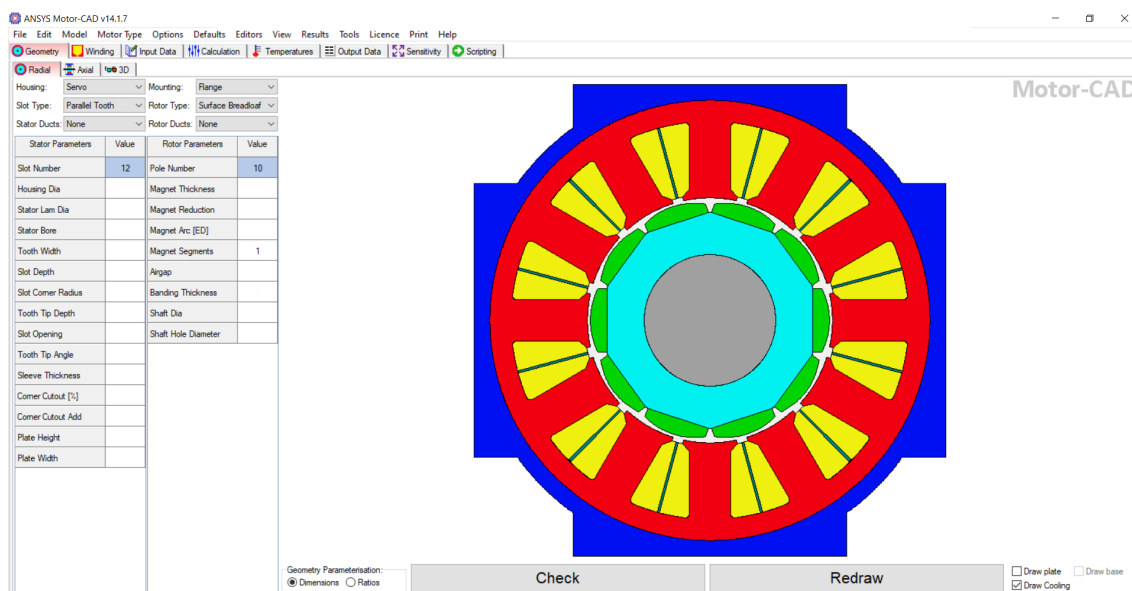
Obr. 2.3: Přestupy tepla prouděním a zářením [13]

## 3 Programová podpora Motor-CAD

Program Motor-CAD je zaměřený na návrh a simulace elektrických strojů. Dokáže pracovat s elektromagnetickým, teplotním a mechanickým modelem. Licence programu Motor-CAD byla poskytnuta firmou, kde byla práce zpracovávána.

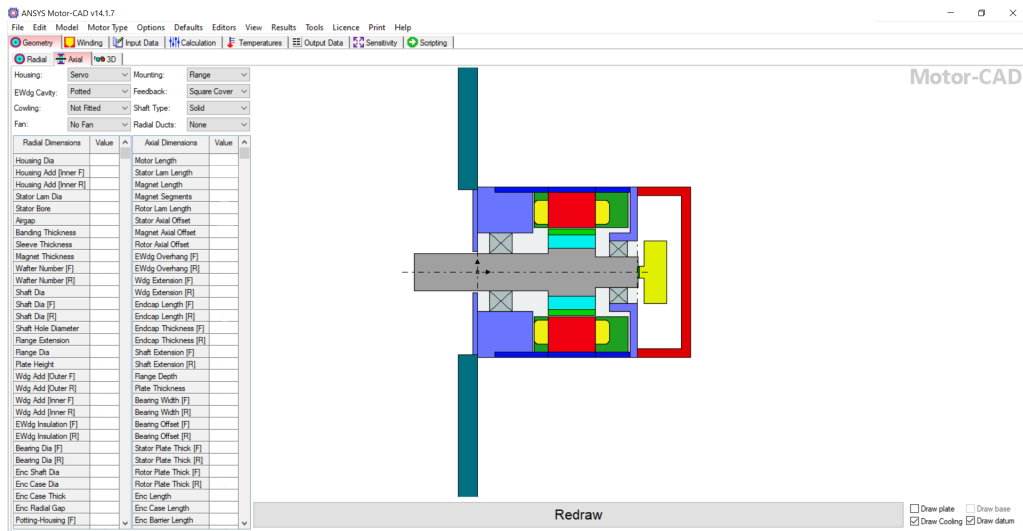
### 3.1 Zadávání geometrie

Zadávání geometrie motoru je velice jednoduché. Zadává se pomocí parametrů, které jsou zobrazeny na základě zvoleného typu motoru a právě upravovaném modelu. Na obr. 3.1 lze vidět geometrii typu motoru BPM, což znamená bezkartáčový motor s permanentními magnety, upravovaný v tepelném modelu. Parametry, které byly v elektromagnetickém modelu jsou obsaženy i v úpravách tepelného modelu. Navíc jsou zde parametry součástí motoru, které souvisí s tepelným modelem. Je to například kostra motoru, chladicí deska, ložiska atd.



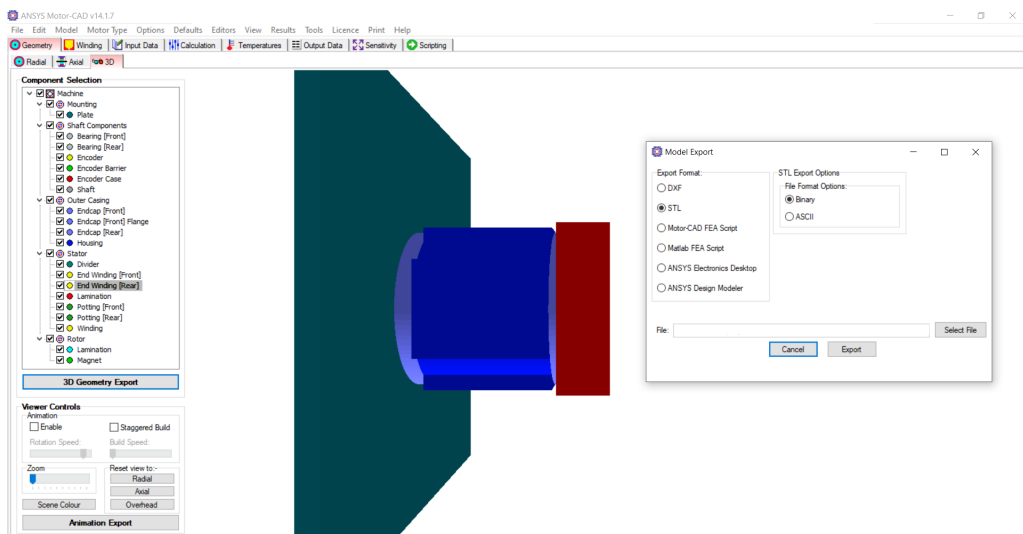
Obr. 3.1: Radiální geometrie

V radiálním pohledu se ovšem nezobrazují všechny parametry, nýbrž pouze základní parametry pro stator a rotor. Z tohoto důvodu je zde ještě axiální pohled, na kterém se zadávají všechny ostatní parametry modelu. Těmito parametry jsou například délka statorového svazku, délka hřídele, ale také i průměr statoru nebo hřídele. Jsou zde také parametry geometrie zpětnovazebního členu, který bude mít také vliv na tepelné ztráty.



Obr. 3.2: Axiální geometrie

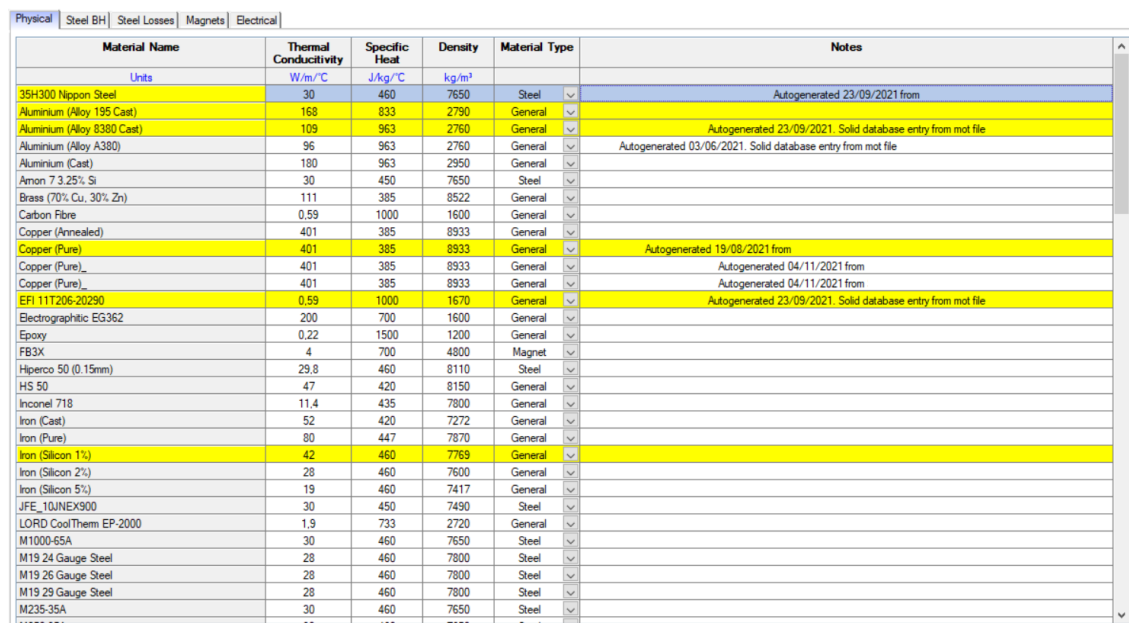
3D geometrie je zde pouze doplňujícím zobrazením modelu. V zobrazení 3D lze zobrazovat/skrývat jednotlivé komponenty modelu a výsledný 3D model lze exportovat do formátu dxf, stl a nebo jako model pro ANSYS Electronics Desktop nebo pro Matlab FEA Script.



Obr. 3.3: Geometrie 3D

## 3.2 Nastavení materiálů a knihovny

Nastavení materiálů, jejich parametrů, probíhá v knihovně. Jedná se o BH křivky, elektrické vodivosti a jejich závislosti na teplotě, tepelné vodivosti a hustoty materiálů pro výpočet váhy stroje. Parametry, které se nastavují jsou závislé na zvoleném typu materiálu.



Material Name	Thermal Conductivity	Specific Heat	Density	Material Type	Notes
Units	W/m°C	J/kg°C	kg/m³		
35H300 Hippon Steel	30	460	7650	Steel	Autogenerated 23/09/2021 from
Aluminium (Alloy 195 Cast)	169	833	2790	General	
Aluminium (Alloy 8380 Cast)	109	963	2760	General	Autogenerated 23/09/2021. Solid database entry from mot file
Aluminium (Alloy A380)	96	963	2760	General	Autogenerated 03/06/2021. Solid database entry from mot file
Aluminium (Cast)	180	963	2950	General	
Amon 7 3 25% Si	30	450	7650	Steel	
Brass (70% Cu, 30% Zn)	111	385	8522	General	
Carbon Fibre	0.59	1000	1600	General	
Copper (Annealed)	401	385	8933	General	
Copper (Pure)	401	385	8933	General	Autogenerated 19/08/2021 from
Copper (Pure)_	401	385	8933	General	Autogenerated 04/11/2021 from
Copper (Pure)_	401	385	8933	General	Autogenerated 04/11/2021 from
EFI 11T206-20290	0.59	1000	1670	General	Autogenerated 23/09/2021. Solid database entry from mot file
Electrographic EG362	200	700	1600	General	
Epoxy	0.22	1500	1200	General	
FB3X	4	700	4800	Magnet	
Hiperco 50 (0.15mm)	29.8	460	8110	Steel	
HS 50	47	420	8150	General	
Inconel 718	11.4	435	7800	General	
Iron (Cast)	52	420	7272	General	
Iron (Pure)	80	447	7870	General	
Iron (Silicon 1%)	42	460	7769	General	
Iron (Silicon 2%)	28	460	7600	General	
Iron (Silicon 5%)	19	460	7417	General	
JFE_10JNEX900	30	450	7490	Steel	
LORD CoolTherm EP-2000	1.9	733	2720	General	
M1000-65A	30	460	7650	Steel	
M19 24 Gauge Steel	28	460	7800	Steel	
M19 26 Gauge Steel	28	460	7800	Steel	
M19 29 Gauge Steel	28	460	7800	Steel	
M235-35A	30	460	7650	Steel	

Obr. 3.4: Knihovna materiálů

## 3.3 Elektromagnetický model

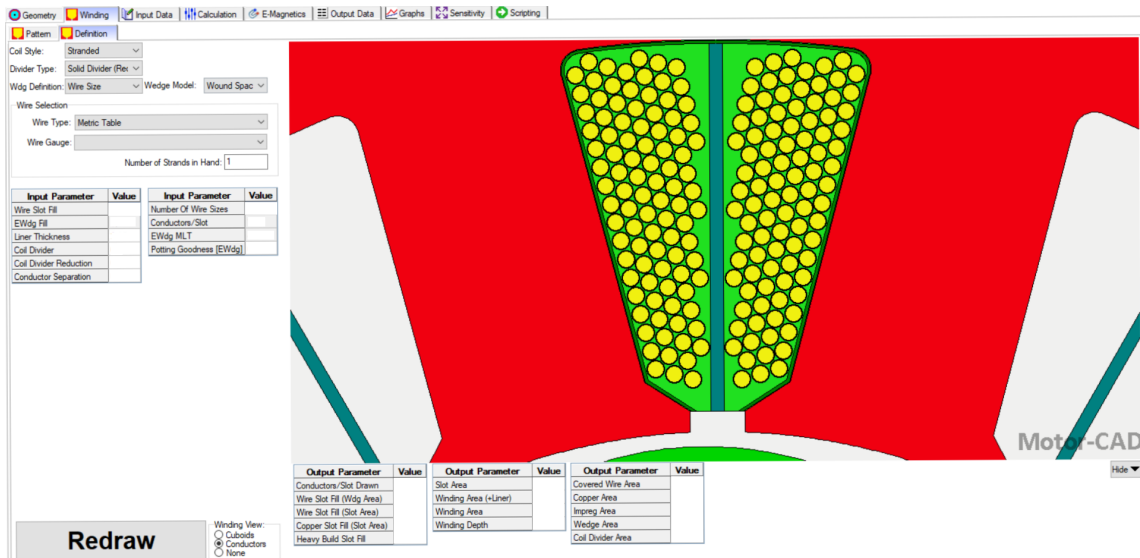
Při nastavování elektromagnetického modelu je nejdůležitější částí vinutí a buzení. Pro vinutí je v programu zvlášť záložka, která se věnuje jeho návrhu. Buzení v případě permanentních magnetů se řeší v materiálové knihovně. Zde se nastaví požadované parametry související s BH křivkou a teplotní koeficient, který udává o kolik se sníží magnetická indukce vlivem teploty.

### 3.3.1 Návrh vinutí

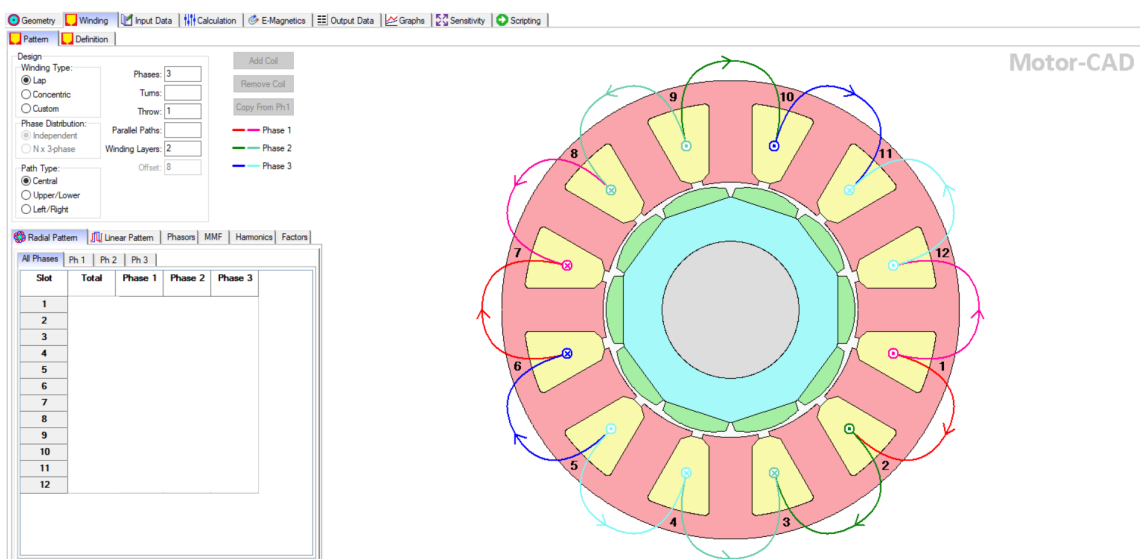
Jak už bylo řečeno, tak vinutí se věnuje celá jedna záložka v elektromagnetickém návrhu. Záložka vinutí obsahuje další dvě podzáložky. Jedna se věnuje návrhu drátu vinutí viz obr. 3.5 a druhá typu vinutí viz obr. 3.6.

Při návrhu drátu vinutí je velmi praktický obrázek s rozložením v drážce viz obr. 3.5. Díky tomuto nástroji lze předběžně vidět jak bude vinutí v drážce rozloženo a to i s izolací drážky a příčnou izolací, pokud se jedná o dvouvrstvé vinutí.

V záložce návrhu typu vinutí se nachází návrh typu a rozložení vinutí. Tento návrh lze sledovat na 2D geometrii statoru nebo se lze přepnout do lineárního rozložení. Další užitečnou funkcí je fázorový diagram, rozložení magnetomotorického napětí a koeficient vinutí.



Obr. 3.5: Rozložení vinutí v drážce a návrh drátu vinutí



Obr. 3.6: Návrh typu a rozložení vinutí

### 3.3.2 Analýza

Jakmile je vše ohledně elektromagnetického modelu nastaveno je možné provést analýzu. Analýza je prováděna pomocí metody konečných prvků. Pro dosažení přesných výsledků je nutné mít správně provedené nastavení.

#### Nastavení

Nastavení analýzy probíhá v záložce "calculation" a "input data"/"calculation".

The image shows a complex software interface for configuring electromagnetic analysis settings. It is divided into several sections:

- Calculation options:** Includes Mesh Control (Stator/Rotor Lam/Slot/Shaft mesh lengths, Min Point Separation), Airgap Mesh (Airgap internal/surface points, Layer Definition), Model Size (Symmetry, Symmetry factor), Threading Options (Single/Multiple threads, Lab Threading), Torque Calculation (Points per cycle, Number of cycles), Back EMF Calculation (Points per cycle, Number of cycles), Cogging Torque Calculation (Points per cycle, Number of cycles), Inductance Calculation (Points per cycle, Number of cycles), Open Circuit Calculation (Q axis current only, No current), Magnetic Solver (Transient, Multi-static, Reduced multi-static), Shaft Mesh (Exclude/Include shaft), Short Circuit Calculation (Points, Duration, Load inertia), Force Calculation (Stator/Rotor Nodes Per Tooth/Pole, Stator/Rotor Node Points, Rotor Node Points, Rotor Force Points), Calculation Method (DC, Small Signal), Small Signal Inductance Solver (Full, Half Cycle, Sixth Cycle), Lumped Force Calculation (Enabled/Disabled).
- Drive:** Shaft Speed (6000), Line Current Definition (Peak, RMS, RMS Current Density), Peak Current (6.223), RMS Current (4.4), RMS Current Density (17), DC Bus Voltage (560), Phase Advance (0), Drive Type (Defined/Calculated Currents), Drive Mode (Sine, Square, Custom, Passive Generator), Winding Connection (Star/Delta), Magnetisation (Parallel, Radial, Halbach).
- Temperatures:** Amature Winding, Magnet, Stator Rotor Lamination, Stator Rotor Sleeve, Rotor Banding, Shaft, Amature Wedge, Housing temperatures (all set to 20).
- E-Magnetic ↔ Thermal Coupling:** No coupling (selected), E-Magnetic Losses → Thermal, E-Magnetic ← Thermal Temperatures, Iterate to Converged Solution.
- Skew:** Skew Type (None, Stator, Rotor), Stator Skew (0), Rotor slices (1).
- Performance Tests:** Single operating points (Open Circuit, Q axis current only, On Load), Open Circuit (Back EMF, Cogging Torque, Electromagnetic Forces), On Load (Torque, Torque Speed Curve, Demagnetization, Electromagnetic Forces), Parameters (Self and Mutual Inductances), Transient (Sudden short-circuit).

Buttons for "Solve E-Magnetic Model" and "Cancel Solving" are visible at the bottom right.

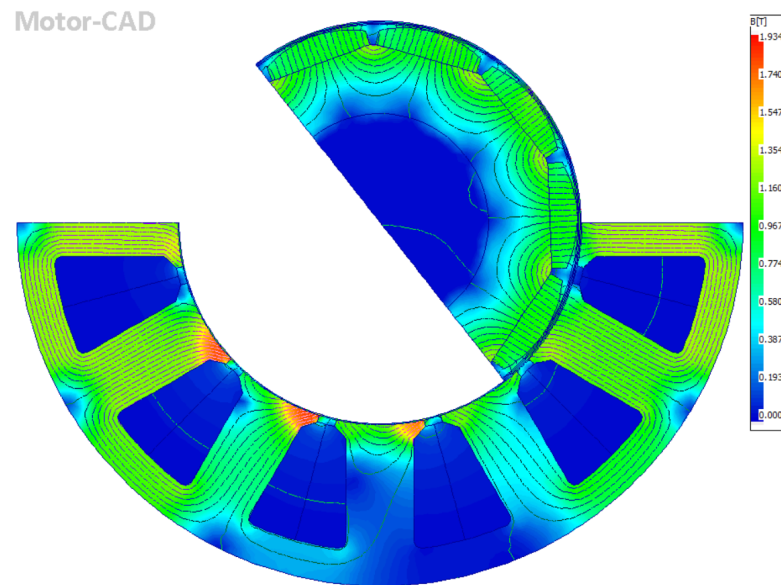
Obr. 3.7: Nastavení analýzy

## Výstupní data

Výstupem z analýzy jsou výstupní data. Ty lze nalézt pod záložkou "output data", kde jsou vypsány u jednotlivých sledovaných parametrů hodnoty. Výstupem z analýzy nejsou pouze číselná data, ale pod záložkou "graphs" jsou grafické průběhy. Mezi nimi nalezneme například průběh indukovaného napětí, momentu, proudů a dalších. Záložka "graphs" u vybraných průběhů obsahuje i grafické rozložení na jednotlivé harmonické signály.

## 2D model konečně prvkové analýzy

Dalším výstupem z analýzy je 2D model s možností vykreslení rozložení zvolených veličin. Například lze na geometrii vykreslit průběh magnetické indukce viz obr. 3.8. Dalšími možnostmi je proudová hustota, vektorový potenciál nebo hustota vířivých proudů. Všechny tyto modely lze sledovat pro různé natočení rotoru vůči statoru.



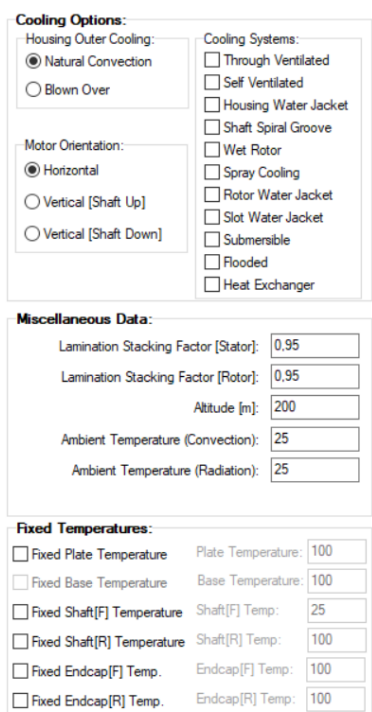
Obr. 3.8: Rozložení magnetické indukce na 2D modelu

## 3.4 Tepelný model

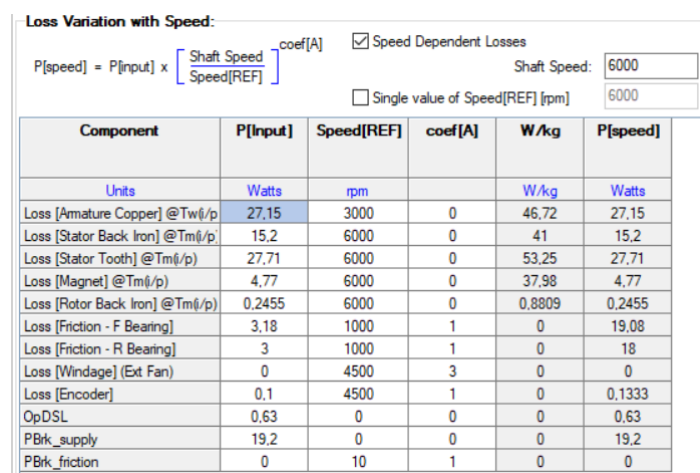
Při přepnutí na tepelný model je nutné dokončit geometrii modelu. Definuje se kostra motoru, možnost uchycení, ložiska, možnosti zalití vinutí, zpětnovazební člen a další mechanické části viz obr. 3.2.

### 3.4.1 Chlazení a ztráty

Dalšími parametry, které je potřeba dodefinovat se týkají chlazení a ztrát. V záložce chlazení lze nastavit nejen okolní teplotu, ale také polohu motoru (vertikální/horizontální), fixovat teplotu na vybraných částech, vybrat typ konvekce a zvolit chladicí systém viz obr. 3.9(a).



(a)



(b)

Component	P[Input]	Speed[REF]	coef[A]	W/kg	P[speed]
Units	Watts	rpm		W/kg	Watts
Loss [Amature Copper] @Tw(i/p)	27.15	3000	0	46.72	27.15
Loss [Stator Back Iron] @Tm(i/p)	15.2	6000	0	41	15.2
Loss [Stator Tooth] @Tm(i/p)	27.71	6000	0	53.25	27.71
Loss [Magnet] @Tm(i/p)	4.77	6000	0	37.98	4.77
Loss [Rotor Back Iron] @Tm(i/p)	0.2455	6000	0	0.8809	0.2455
Loss [Friction - F Bearing]	3.18	1000	1	0	19.08
Loss [Friction - R Bearing]	3	1000	1	0	18
Loss [Windage] (Ext Fan)	0	4500	3	0	0
Loss [Encoder]	0.1	4500	1	0	0.1333
OpDSL	0.63	0	0	0	0.63
PBrk_supply	19.2	0	0	0	19.2
PBrk_friction	0	10	1	0	0

Obr. 3.9: Nastavení (a) chlazení motoru (b) ztrát motoru

Dále se definují ztráty. Některé mohou být převzaty z elektromagnetické analýzy jako ztráty ve vinutí, v železe a magnetech. Ostatní ztráty se musí definovat ručně. Těmito ztrátami jsou mechanické v ložiscích, ztráty ventilační a další dodatečné ztráty. Všechny mají vliv na oteplení motoru. Při zadávání ztrát je možné využít zadání při referenčních otáčkách a nechat přepočítávat v závislosti na uvažovaných otáčkách. Pro tento přepočet je potřeba mít definovanou závislost pomocí koeficientu. Například jak je vidět tak ventilační jsou závislé s třetí mocninou viz obr. 3.9(b).

## Tepelné přestupy

Tepelné přestupy jsou definovány ve všech třech mechanismech přestupů tepla viz kapitola 2.

Prvním je vedení tepla (konduktce). Pro přesný výpočet je nutné zadat kvalitu kontaktního spoje mezi jednotlivými díly. Je možné vybrat v detailech typ spoje a velikost mezery se vyplní automaticky a nebo je možné zadat velikost mezery ručně.

Component	Gap	Interface Material	Thermal Conductivity	Details	Resistance @T=100.0°C	Conductance @T=100.0°C
Units	mm		W/m°C		m2.C/W	W/m2.C
Stator Lam - Housing	0	Air (Motor-CAD model)	0.03171	Lamination-Metal - Perfect surface Contact (0)	0	1E09
Housing - OHang [F]	0.00119999	Air (Motor-CAD model)	0.03171	Aluminium-Aluminium - Good surface Contact (0.0012)	3.784E-05	2.643E04
Housing - OHang [R]	0.00119999	Air (Motor-CAD model)	0.03171	Aluminium-Aluminium - Good surface Contact (0.0012)	3.784E-05	2.643E04
Housing - Endcap [F]	0.0017	Air (Motor-CAD model)	0.03171	Aluminium-Aluminium - Medium surface Contact (0.0017)	5.36E-05	1.866E04
Housing - Endcap [R]	0.0017	Air (Motor-CAD model)	0.03171	Aluminium-Aluminium - Medium surface Contact (0.0017)	5.36E-05	1.866E04
Endcap - Plate	0.0022	Air (Motor-CAD model)	0.03171	Aluminium-Aluminium - Poor surface Contact	6.937E-05	1.442E04
Endcap - Encoder	0.0012	Air (Motor-CAD model)	0.03171	Aluminium-Aluminium - Good surface Contact	3.784E-05	2.643E04
Magnet - Rotor Lam	0.005	Air (Motor-CAD model)	0.03171	Metal-Metal - Average surface Contact (0.005)	0.0001577	6341
Rotor Lam - Shaft	0.01	Air (Motor-CAD model)	0.03171	Lamination-Metal - Good surface Contact (0.01)	0.0003153	3172
Bearing Effective Gap [F]	0.4	Air (Motor-CAD model)	0.03171	High Effective Gap [Torino Testing] (0.4)	0.01261	79.3
Bearing Effective Gap [R]	0.4	Air (Motor-CAD model)	0.03171	High Effective Gap [Torino Testing] (0.4)	0.01261	79.3
Bearing - Endcap [F]	0.0073	Air (Motor-CAD model)	0.03171	Stainless-Aluminium - Medium surface Contact (0.0073)	0.0002302	4344
Bearing - Endcap [R]	0.0073	Air (Motor-CAD model)	0.03171	Stainless-Aluminium - Medium surface Contact	0.0002302	4344
Bearing - Shaft [F]	0	Air (Motor-CAD model)	0.03171	Stainless-Stainless - Medium surface Contact	0	1E09
Bearing - Shaft [R]	0	Air (Motor-CAD model)	0.03171	Stainless-Stainless - Medium surface Contact	0	1E09
Shaft - Enc Shaft	0.005	Air (Motor-CAD model)	0.03171	Metal-Metal - Average surface Contact	0.0001577	6341
Potting-Housing [F]	0	Air (Motor-CAD model)	0.03171	No Gap - Perfect surface Contact	0	1E09
Potting-Endcap [F]	0.5	Air (Motor-CAD model)	0.03171		0.01577	63.41
Potting-Housing [R]	0	Air (Motor-CAD model)	0.03171	No Gap - Perfect surface Contact	0	1E09
Potting-Endcap [R]	1	Air (Motor-CAD model)	0.03171		0.03153	31.72

Obr. 3.10: Nastavení tepelných přestupů kondukcí

Dalšími mechanismy přestupu tepla je radiace a konvekce. Pro přestup tepla pomocí radiace je důležitým parametrem emisivita daného povrchu viz obr. 3.11.

U přestupu tepla konvekcí je možné definovat součinitel přestupu tepla tak jako na obrázku viz obr. 3.12. Ten ale již bývá zadán v materiálových vlastnostech. Nicméně je možné jej zadat zde, nezávisle na materiálové knihovně, případně provést procentuální navýšení zvolením násobitele.

Include Radiation in Lump Circuit Model  
 Include Internal Radiation in Lump Circuit Model  
 Single Emissivity value: 0.95

dT used in table below - External Radiation [degC]: 100  
 dT used in table below - Internal Radiation [degC]: 10

Component	Emissivity	View Factor	hr @dT=100.0°C	Area	Rt @dT=100.0°C
Units			W/m²°C	mm²	°C/W
Housing [Front]	0.95	1	9.28	1.507E04	7.149
Housing [Front] - Corner Cutout	0.95	1	9.28	0	1E09
Housing [Active]	0.95	1	9.28	1.337E04	8.057
Housing [Active] - Corner Cutout	0.95	1	9.28	0	1E09
Housing [Rear]	0.95	1	9.28	9766	11.03
Housing [Rear] - Corner Cutout	0.95	1	9.28	0	1E09
Endcap [Front] - Radial Area	0.95	1	9.28	4119	26.16
Endcap [Rear] - Radial Area	0.95	1	9.28	1791	60.18
Endcap [Rear] - Axial Area	0.95	1	9.28	0	1E09
Flange Mounted Plate	0.95	1	9.28	1.818E05	0.5926
Encoder Cover - Radial Area	0.95	1	9.28	1.614E04	6.676
Encoder Cover - Axial Area	0.95	1	9.28	1.3E04	8.292

Obr. 3.11: Nastavení tepelných přestupů radiací

Motor Orientation = Horizontal

dT used in table below [°C]: 100

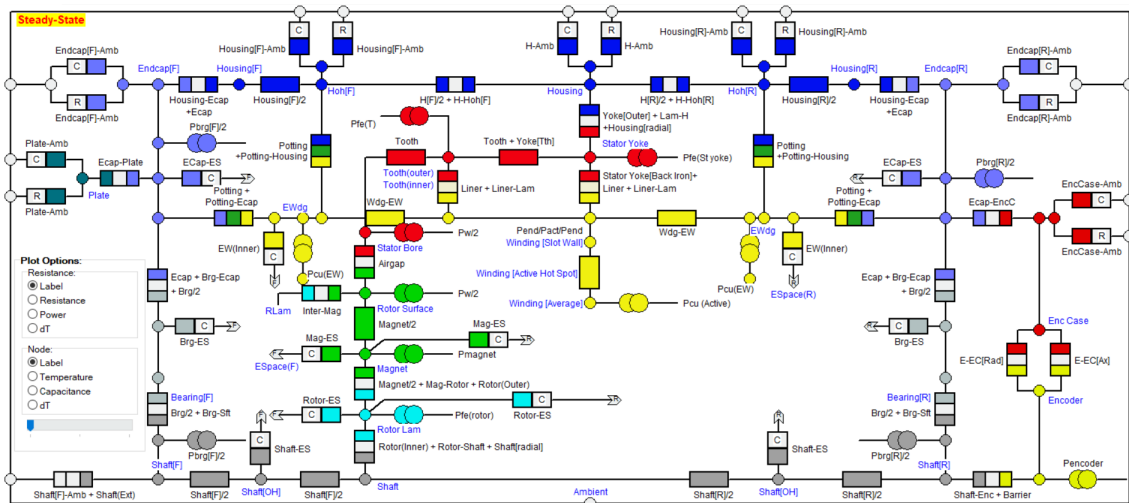
Component	Input h?	Convection Correlation	h[input] or h[adjust]	hnc @ dT=100,0°C	Area	Rt @ dT=100,0°C
Units			W/m²/°C	W/m²/°C	mm²	°C/W
Housing [Active]	<input type="checkbox"/>	Horiz Servo Housing	1	6,686	1,337E04	11,18
Housing [Front]	<input type="checkbox"/>	Horiz Servo Housing	1	6,686	1,507E04	9,922
Housing [Rear]	<input type="checkbox"/>	Horiz Servo Housing	1	6,686	9766	15,31
Endcap [Front] - Radial Area	<input type="checkbox"/>	Horizontal Cylinder	1	6,935	4119	35,01
Endcap [Front] - Axial Area	<input type="checkbox"/>	Vertical Flat Plate	1	7,793	9012	14,24
Endcap [Rear] - Radial Area	<input type="checkbox"/>	Horizontal Cylinder	1	6,935	1791	80,53
Flange Mounted Plate	<input type="checkbox"/>	Vertical Flat Plate	1	6,093	1,818E05	0,9025
Encoder Cover - Radial Area	<input type="checkbox"/>	Horiz Square Tube	1	6,505	1,614E04	9,523
Encoder Cover - Axial Area	<input type="checkbox"/>	Vertical Flat Plate	1	7,793	1,3E04	9,874

Obr. 3.12: Nastavení tepelných přestupů konvekci

### 3.4.2 Schématické zobrazení tepelné sítě

Po zadání potřebných parametrů lze zkontrolovat vše ve schématu tepelné sítě. Lze zde vidět všechna napojení mezi jednotlivými částmi a také je možné schéma upravovat. To znamená, že pokud motor obsahuje část, která je významná pro tepelnou analýzu a není zde umístěna defaultně, tak je možné ji doplnit ručním zadáním. Po provedení analýzy lze zde také sledovat teploty v jednotlivých uzlech, výkon přestupující přes jednotlivé odpory a další.

Schématické zobrazení má dvě podzáložky. První je přehled viz obr. 3.13 a na druhé je detailní tepelná síť.



Obr. 3.13: Tepelná síť motoru – přehled

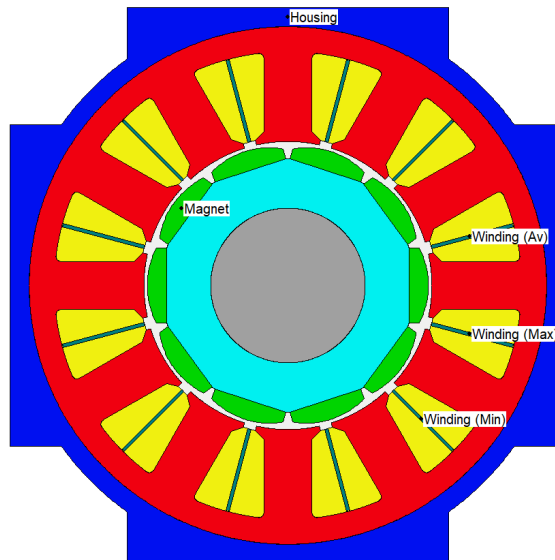
Detailní tepelná síť je zobrazena viz obr. 3.14. Jak je vidět je rozsáhlá a proto bylo zvoleno nezobrazovat popisky tepelných odporů.



### 3.4.3 Sledování oteplení na jednotlivých částech motoru

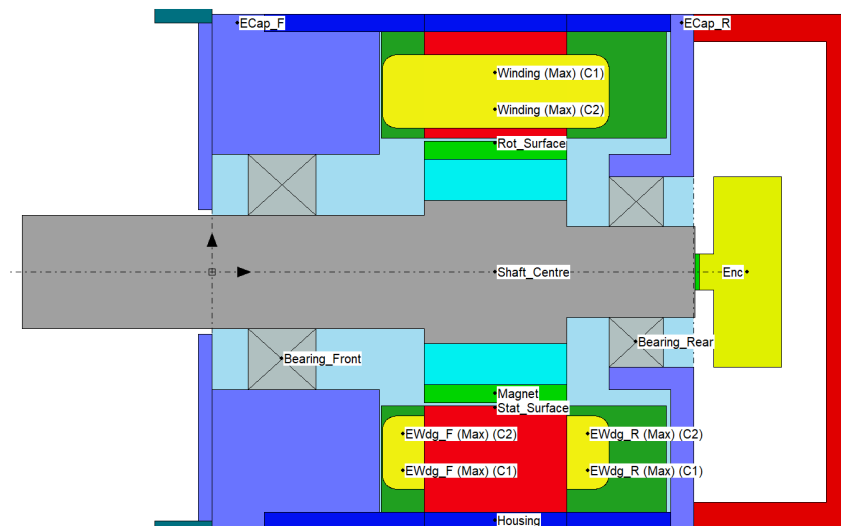
Výsledné teploty a oteplení lze, mimo schématické zobrazení a výstupní parametry, sledovat na 2D geometriích motoru.

#### Radiální model motoru



Obr. 3.15: Radiální model s názvy tepelných bodů

#### Axiální model motoru



Obr. 3.16: Axiální model s názvy tepelných bodů

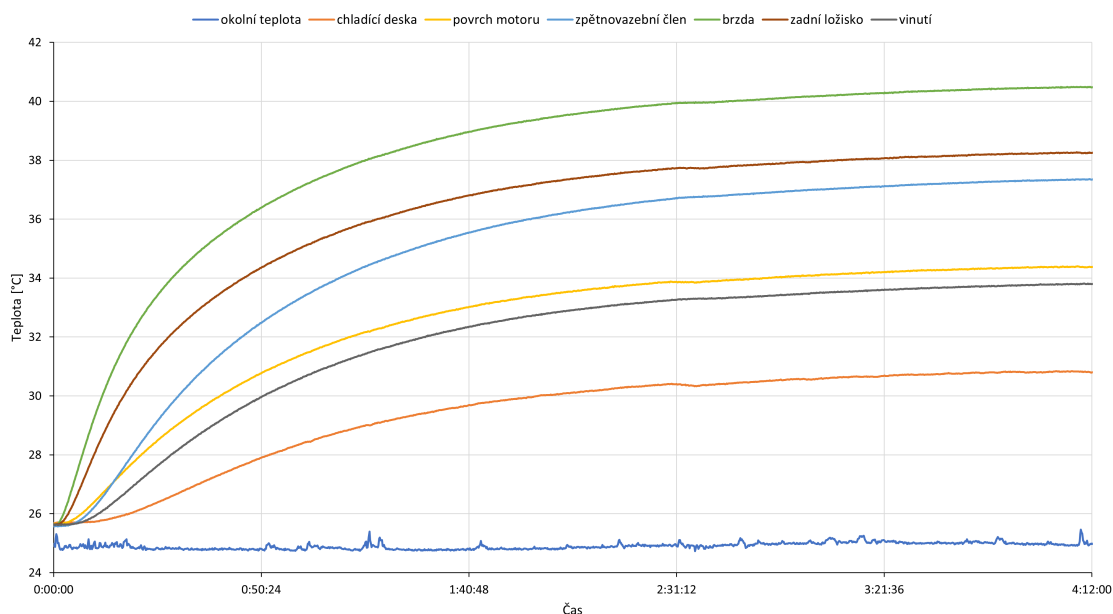
## 4 Měření jmenovitého oteplení zvoleného motoru

Na dodaném motoru bylo provedeno měření oteplení ve jmenovitém bodě otáček a momentu. Jedná se o servomotor s 12 drážkami na statoru, 10 pólovým rotorem, jmenovitými otáčkami 6000 ot./min, momentem 6,69 Nm a výkonem 2,83 kW. Motor je dále vybaven parkovací brzdou a zpětnovazebním členem typu DSL.

Pro vytvoření tepelného modelu byly změřeny oteplení při zatíženém motoru pro různé otáčky, ale také byly změřeny oteplení generovaná od parkovací brzdy a zpětnovazebního členu.

### 4.1 Oteplení od parkovací brzdy

Parkovací brzda při odbrzděném motoru generuje teplo, jelikož její cívkou protéká proud. Příkon pro brzdu byl změřen voltampérovou metodou. Hodnota příkonu v tomto stavu je 19,2 W. Oteplení bylo sledováno na celkem 8 termočláncích, z nichž jeden byl použit pro okolní teplotu. Průběh oteplení viz obr. 4.1.



Obr. 4.1: Graf průběhu oteplení od parkovací brzdy

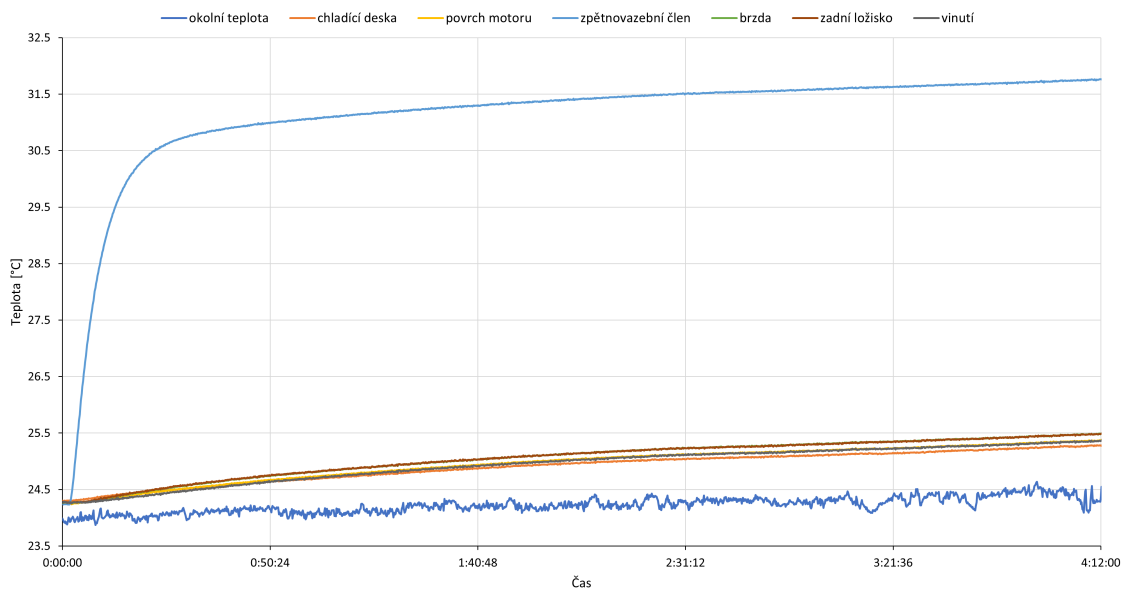
Jednotlivé teploty sledovaných částí jsou vypsány v následující tabulce.

Tab. 4.1: Teploty částí po oteplovací zkoušce od parkovací brzdy

Okolí	Chladicí deska	Povrch motoru	Zpětnovazební člen	Brzda	Zadní ložisko	Vinutí
24,90 °C	30,80 °C	34,40 °C	37,35 °C	40,50 °C	38,25 °C	33,80 °C

## 4.2 Oteplení od zpětnovazebního členu

Stejně jako parkovací brzda, tak i zpětnovazební člen generuje teplo jakmile je připojen na napájení. Příkon zpětnovazebního členu je mnohem menší než u brzdy a byl změřen 0,63 W. Zapojení termočlánků pro měření bylo stejné jako u měření oteplení od brzdy. Průběh oteplení viz obr. 4.2. Teploty sledovaných částí jsou opět uvedeny v tabulce viz tab. 4.2.



Obr. 4.2: Graf průběhu oteplení od zpětnovazebního členu

Tab. 4.2: Teploty částí po oteplovací zkoušce od zpětnovazebního členu

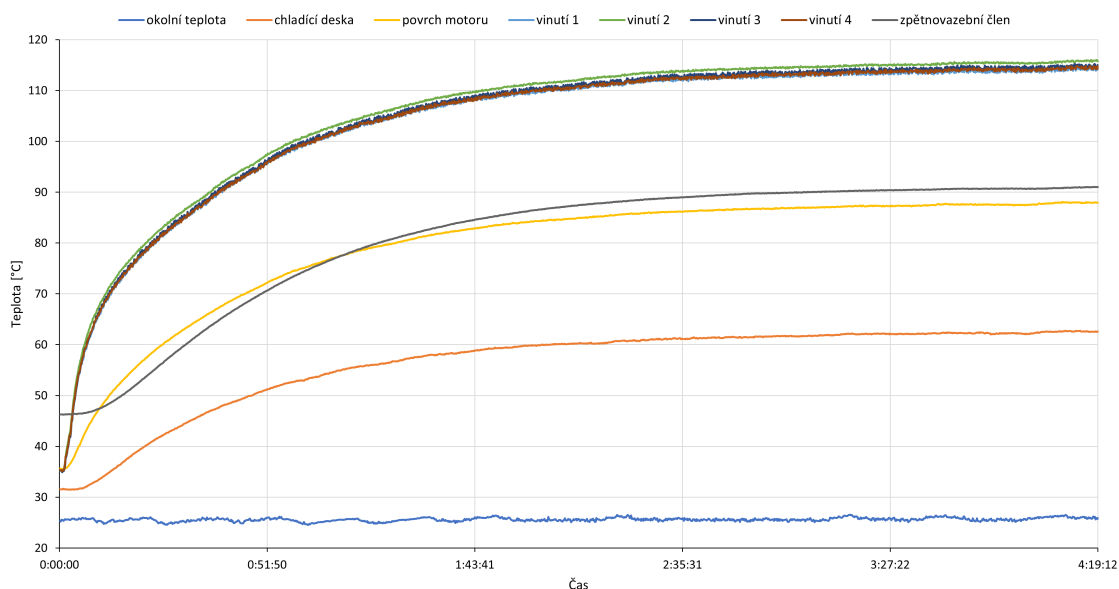
Okolí	Chladicí deska	Povrch motoru	Zpětnovazební člen	Brzda	Zadní ložisko	Vinutí
24,65 °C	25,55 °C	25,65 °C	32,05 °C	25,80 °C	25,80 °C	25,65 °C

## 4.3 Oteplovací zkouška

Při měření oteplení byla snaha se co nejlíže přiblížit maximálnímu dovolenému oteplení na kritických částech motoru. Těmito částmi je vinutí, pro které je definované maximální oteplení 100 K při okolní teplotě 25 °C, a druhým kritickým místem je zpětnovazební člen, který má definované oteplení 75 K při 25 °C. Měření bylo prováděno při okolní teplotě 25 °C, maximální teplota vinutí byla tedy stanovena na 125 °C a maximální teplota zpětnovazebního členu na 100 °C. Oteplovací zkoušky byly provedeny při různých otáčkách, jelikož servomotory nepracují vždy při jmenovitých otáčkách. Využívá se u nich možnosti vyššího momentu při nižších otáčkách, s rostoucími otáčkami momentová zatížitelnost klesá z důvodu nárůstu třecích ztrát od ložisek a ztrát v železe.

### 4.3.1 Při 200 ot./min

Jako první byla provedena oteplovací zkouška při nízkých otáčkách (200 ot./min). Při chodu motoru na pomalé otáčky vznikají téměř veškeré ztráty ve vinutí statoru, zatímco ztráty v železe jsou v tomto případě takřka zanedbatelné. Z tohoto důvodu je pro pomalé otáčky kritická teplota ve vinutí. Z uvedeného grafu je zřejmé, že v tomto režimu chodu motoru je maximální dodávaný výkon omezen maximálním dovoleným oteplením statorového vinutí.



Obr. 4.3: Graf průběhu oteplení při 200 ot./min

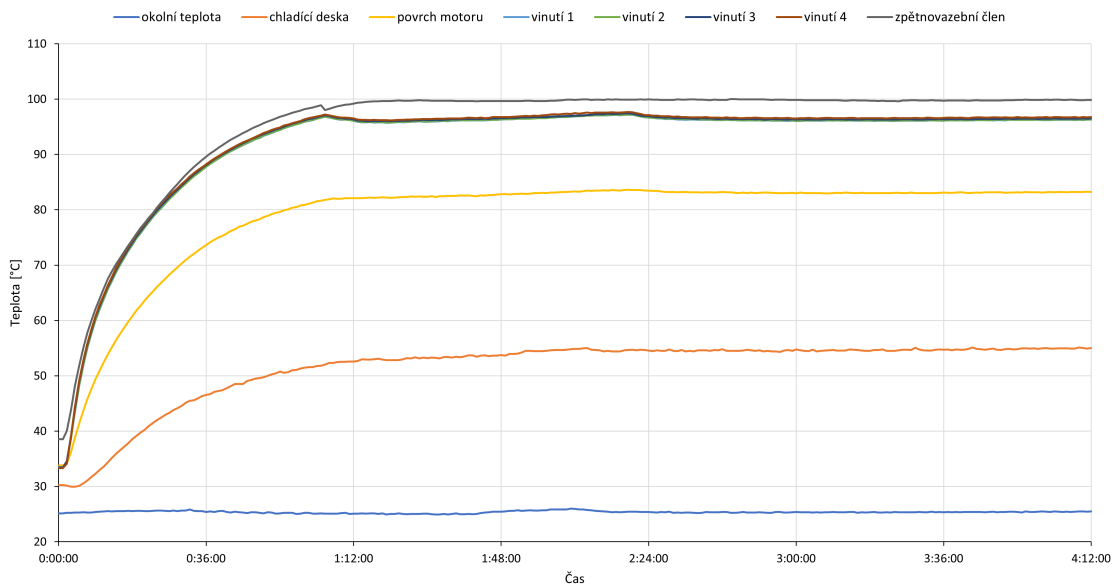
Maximálního dovoleného oteplení ve vinutí při momentu stanoveném pro dané otáčky nebylo dosaženo, motor pracuje v tomto bodě s výkonovou rezervou.

Tab. 4.3: Teploty částí po oteplovací zkoušce 200 ot./min

Okolí	Chladicí deska	Povrch motoru	Vinutí	Zpětnovazební člen
25,6 °C	62,9 °C	88,5 °C	116,2 °C	91,3 °C

### 4.3.2 Při 6000 ot./min

Další oteplovací zkouška vybraného motoru byla provedena při jmenovitých otáčkách na hřídeli 6000 ot./min. Při této zkoušce byl kritickou částí zpětnovazební člen, a to z důvodu vyšších ztrát mechanických (ložiska, parkovací brzda, samotný zpětnovazební člen) a ztrát v železe. Ztráty ve vinutí jsou nižší, jelikož je nutné snížit proud, tak aby nedošlo k překročení maximální dovolené teploty zpětnovazebního členu.



Obr. 4.4: Graf průběhu oteplení při 6000 ot./min

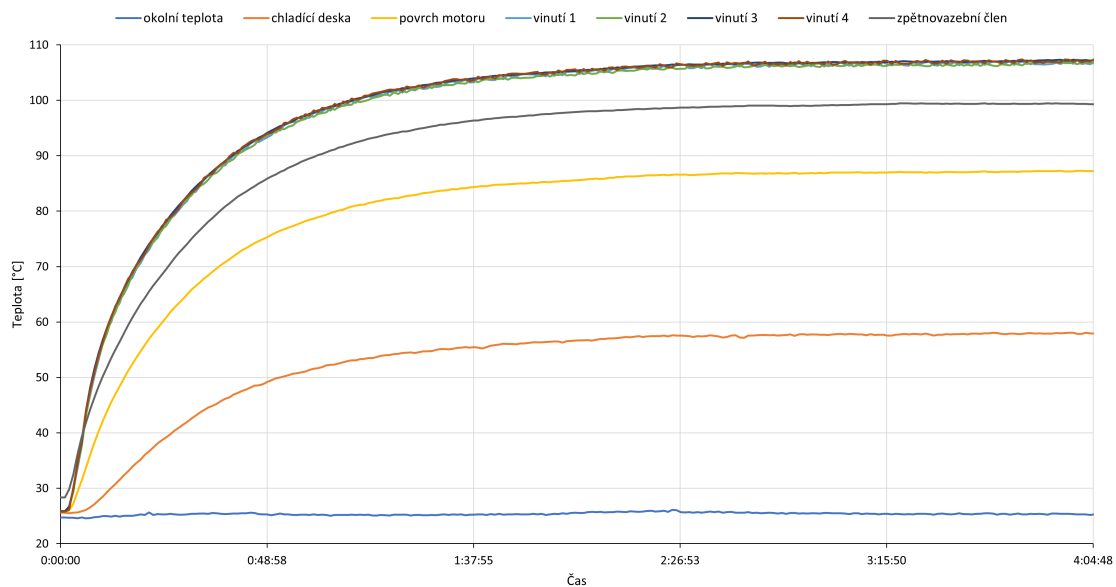
V průběhu oteplení je možné si všimnout dvou bodů, kdy teplota pro vinutí a zpětnovazební člen má záporný gradient. U obou těchto bodů je tento průběh způsoben změnou zatížení motoru kvůli dodržení maximálního dovoleného oteplení.

Tab. 4.4: Teploty částí po oteplovací zkoušce 6000 ot./min

Okolí	Chladicí deska	Povrch motoru	Vinutí	Zpětnovazební člen
25,4 °C	55 °C	83,3 °C	96,7 °C	99,9 °C

### 4.3.3 Při 4000 ot./min

Poslední oteplovací zkouška byla provedena při otáčkách 4000 ot./min. Tato zkouška byla provedena z důvodu doplnění bodu do křivky závislosti momentu na otáčkách. Zároveň bude možné díky ní zkontrolovat nastavení modelu oteplení jednotlivých částí pro otáčky a moment mimo krajní hodnoty motoru.



Obr. 4.5: Graf průběhu oteplení při 4000 ot./min

Tab. 4.5: Teploty částí po oteplovací zkoušce 4000 ot./min

Okolí	Chladicí deska	Povrch motoru	Vinutí	Zpětnovazební člen
25,4 °C	58 °C	87,3 °C	107,4 °C	99,5 °C

## 5 Elektromagneticko – tepelný výpočet

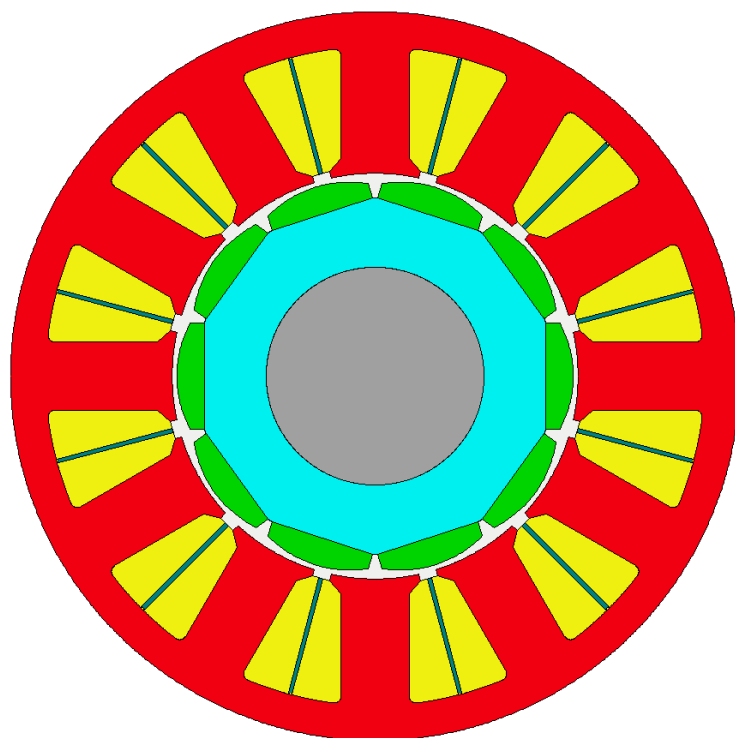
Elektromagnetický i tepelný výpočet byl proveden v programu Motor-CAD. Tepelný model v programu byl laděn dle změřených parametrů viz kapitola 4.3. Prvním úkolem bylo naladit elektromagnetický model.

### 5.1 Elektromagnetický model v Motor-CAD

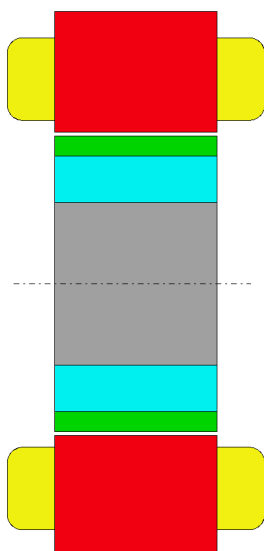
Pro elektromagnetický model se ladily parametry indukovaného napětí naprázdno při 1000 otáčkách za minutu a odpor vinutí při okolní teplotě. Indukované napětí naprázdno při 1000 ot./min bylo změřeno 46,04 V a průměrná hodnota odporu mezi fázemi 0,7484  $\Omega$  při teplotě 25,1  $^{\circ}\text{C}$ .

#### 5.1.1 Geometrie

Model geometrie motoru byl dodán firmou, která motor navrhovala. Parametry byly pouze překontrolovány s výkresovou dokumentací. Zobrazení geometrie v elektromagnetickém modelu je možné vidět na obr. 5.1 a obr. 5.2.



Obr. 5.1: Radiální geometrie pro elektromagnetický model

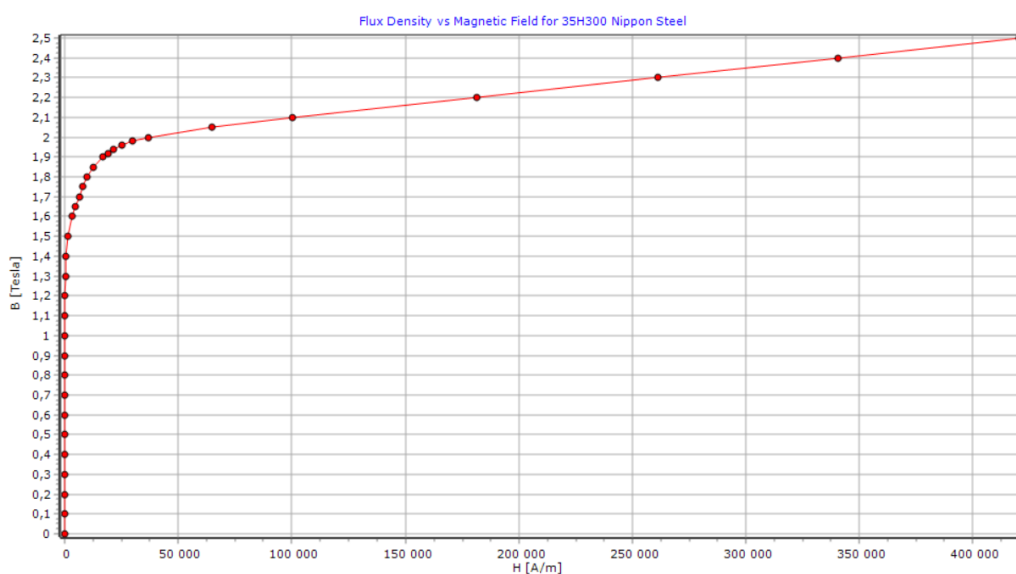


Obr. 5.2: Axiální geometrie pro elektromagnetický model

Dále bylo zadáno vinutí motoru viz obr. 3.5 a obr. 3.6. Na prvním obrázku lze vidět rozložení vinutí v drážce a parametry drátu, ze kterého je vinutí navinuto. Druhý obrázek ukazuje typ vinutí, které je navíjeno jako dvouvrstvé soustředěné a třífázové.

## 5.1.2 Materiály

Materiály, které se v modelu objevují byly taktěž součástí dodaného modelu. Na prvním obrázku lze vidět BH křivku použitého materiálu pro plechy statoru a rotoru.



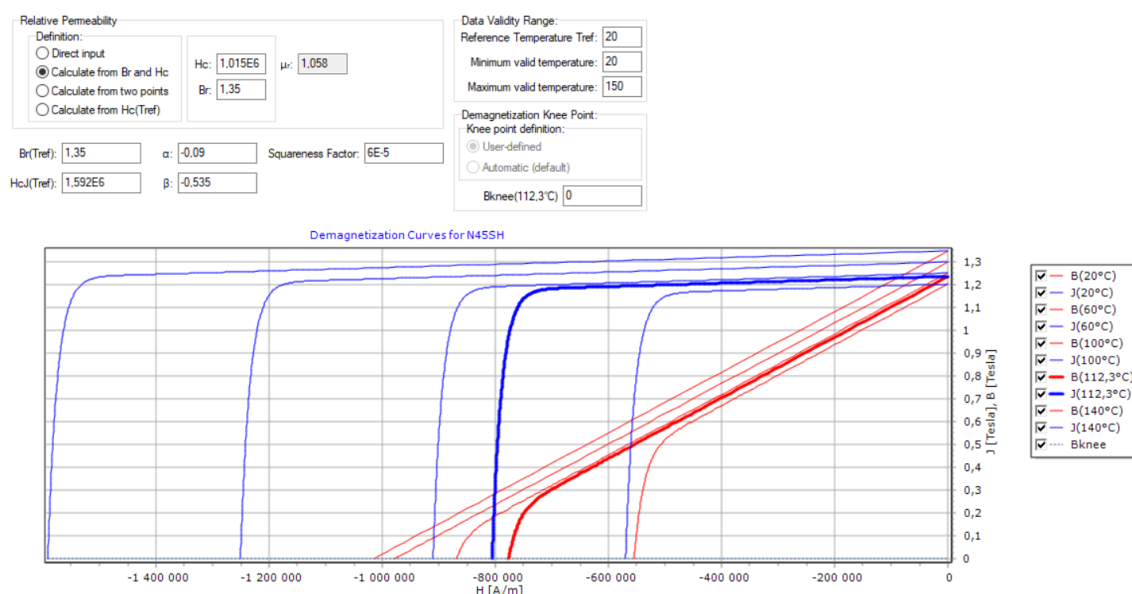
Obr. 5.3: Parametry materiálu pro plechy statoru

Parametry materiálu vinutí jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 5.1: Parametry materiálu vinutí

Rezistivita při 20 °C	Teplotní součinitel odporu
1,68E-8 Ω/m	0,003862 K <sup>-1</sup>

Pro permanentní magnety lze vidět vykreslenou BH křivku a doplňující parametry. Mezi nimi je například parametr  $\alpha$ , který udává procentuální pokles remanentní indukce magnetu na 1 °C. Totéž udává koeficient  $\beta$  pro koercitivní sílu.



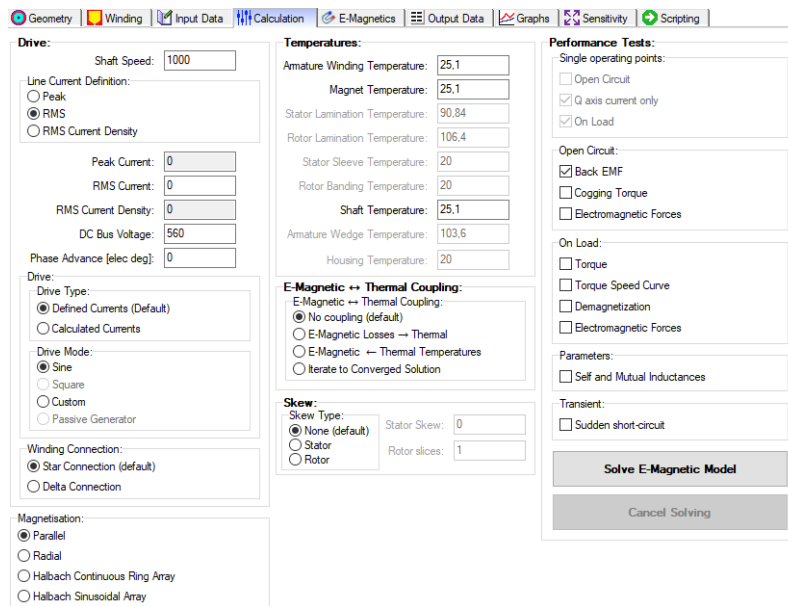
Obr. 5.4: Parametry materiálu magnetů

### 5.1.3 Výpočet

Výpočet elektromagnetického modelu byl nastaven viz obr. 5.5. Jak lze vidět na obrázku, tak otáčky byly nastaveny na hodnotu 1000 ot./min, pro zjištění napěťové konstanty motoru  $k_E$ . Proud byl zadán nulový, interakce mezi elektromagnetickým modelem a tepelným byla vypnuta a teplota na částech motoru byla nastavena 25,1 °C, což odpovídá reálné okolní teplotě, při které byla zkouška provedena.

Po provedení analýzy byly zkontrolovány výstupy, indukované napětí a odpor vinutí mezi fázemi. Hodnota indukovaného napětí byla vypočtena 49,2 V a odpor mezi fázemi 0,8341 Ω. Obě tyto hodnoty se neshodují s hodnotami změřenými. Abychom se analýzou přiblížili změřeným hodnotám, je možné měnit multiplikační koeficient pro výrobní faktory. Těmito faktory lze ovlivnit délku čel vinutí a remanentní indukci

magnetů. Tyto hodnoty byly změněny, u vinutí z hodnoty 1 na hodnotu 0,7969 pro délku čel vinutí a pro magnety ze stejné hodnoty na hodnotu 0,9322 pro remanentní indukci.



Obr. 5.5: Nastavení elektromagnetické analýzy

Po opětovné analýze je hodnota indukovaného napětí při 1000 ot./min rovna 46,04 V a hodnota odporu vinutí mezi fázemi 0,7484  $\Omega$ . Tyto hodnoty jsou dostatečně přesné ve srovnání hodnot z analýzy a hodnot změřených.

## 5.2 Tepelný model v MotorCADu

Pro tepelný model jsou kontrolovanými parametry ustálená oteplení jednotlivých částí. Tyto hodnoty byly změřeny při oteplovacích zkouškách a jsou k nalezení v kapitole 4.

### 5.2.1 Geometrie

Geometrie motoru byla doplněna o zalití vinutí, kostru motoru, ložiska, chladicí desku a zpětnovazební člen. Pro kostru motoru byl zvolen typ Servo, způsob uchycení byl zvolen na přírubu. Výstřižky z programu byly již použity v kapitole 3. Obrázky, na kterých lze vidět zadávanou geometrii, jsou obr. 3.1 pro radiální zadání parametrů a obr. 3.2 pro axiální zadání parametrů geometrie. V záložce vinutí bylo zachováno nastavení dodaného modelu.

## 5.2.2 Chlazení

V záložce vstupních dat je pro analýzu důležité nastavení chlazení. Z hlediska konvekce je nastaveno na přirozenou, orientace motoru je horizontální a chladicí systém není zvolen žádný viz obr. 3.9(a). Činitel plnění železa pro stator i rotor je nastavený na stejnou hodnotu 0,95. Okolní teplota je nastavena dle změřené teploty při oteplovací zkoušce.

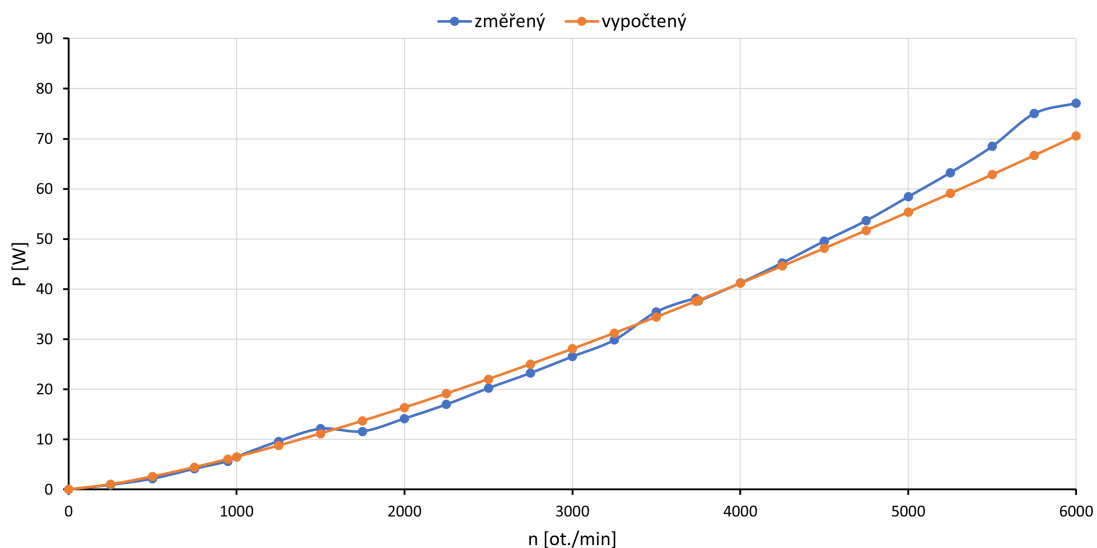
Z hlediska přestupu tepla je hodnota emisivity povrchu nastavena na hodnotu 0,95 a to na všech vnějších částech kromě hřídele, která není zahrnuta. Z hlediska kvality kontaktního spoje je výchozí nastavení viz obr. 3.10.

## 5.2.3 Ztráty

V záložce ztrát se zadávají ztráty v ložiscích, ztráty zpětnovazebního zařízení a další. Pro tento model se zadávaly ztráty vlivem napájení elektromagnetické brzdy, vlivem napájení a otáčkově závislé ztráty zpětnovazebního členu a ztráty v ložiscích. Ztráty v ložiscích byly zadány na základě měření naprázdno za teplého stavu.

### Ztráty naprázdno

Ztráty naprázdno byly změřeny, jak již bylo zmíněno, za teplého stavu. Toho se dosáhlo oteplovací zkouškou a ihned po ustálení teplot byla provedena zkouška naprázdno pomocí dynamometru. Ten roztáčel motor od 0 do 6000 ot./min s krokem 250 ot./min. Pro každé otáčky motoru po ustálení momentu byl odečten výkon.



Obr. 5.6: Průběh ztrát naprázdno

Ze změřených hodnot byl vytvořen graf viz obr. 5.6 křivka změřený. Křivka vypočtený je složena z hodnot, které byly vypočteny dle rov. 5.1 s referenčními ztrátami při 1000 ot./min.

$$P_x = P_{\text{ref}} \left( \frac{n_x}{n_{\text{ref}}} \right)^{1,33} \quad (5.1)$$

$P_x$  je hodnota výkonu při aktuálních zadávaných otáčkách  $n_x$ .  $P_{\text{ref}}$  je referenční výkon při 1000 ot./min a  $n_{\text{ref}}$  jsou otáčky pro referenční výkon, 1000 ot./min. Koefficient 1,33 byl iteračně zadáván, tak aby medián rozdílu vypočtených a změřených výkonů byl v ideálním případě roven 0, čehož bylo dosaženo.

Ztráty naprázdno byly v modelu rozloženy do ztrát v předním a zadním ložisku. Část byla zadána do otáčkově závislých ztrát ve zpětnovazebním zařízení, konkrétně ztráty 0,05 W při 4500 ot./min, což byla hodnota se kterou model počítal již před úpravou. Ztráty třením v elektromagnetické brzdě byly zohledněny zadáním větší části do zadního ložiska, jelikož model brzdu neobsahuje a tak musela být přidána až ve schématu tepelné sítě. Bylo by možné je zadat i do dalšího ručně vytvořeného parametru ztrát, ale model by s tímto parametrem dál nepočítal ve výpočtu účinnosti.

## 5.2.4 Úprava schématu tepelné sítě

Jak již bylo zmíněno, tak model neobsahuje elektromagnetickou brzdu ,a proto musely být parametry pro výpočet tepelného modelu zadány pro brzdu ručně. Zároveň byly upraveny některé vazby týkající se vinutí a zpětnovazebního členu. Provedené úpravy na základě skutečných tepelných vazeb mezi částmi je vidět na detailu schématu tepelné sítě viz obr. 5.8. Pro orientaci v tepelném schématu byla vytvořena jednoduchá legenda vysvětlující označení jednotlivých uzlů viz tab. 5.2.

Tab. 5.2: Legenda pro tepelné schéma

Označení	Název
Bearing_Rear	Zadní ložisko
Brk	Parkovací brzda
Enc	Zpětnovazební člen
ECap_R	Zadní štít motoru
Enc_Case	Kryt zpětnovazebního členu
Enc_Amb	Teplota pod krytem Enc_Case
EWdg (...)	Čela vinutí
Housing (_R, _OH_R)	Kostra motoru
Shaft (_R, _OH_R)	Hřídel motoru

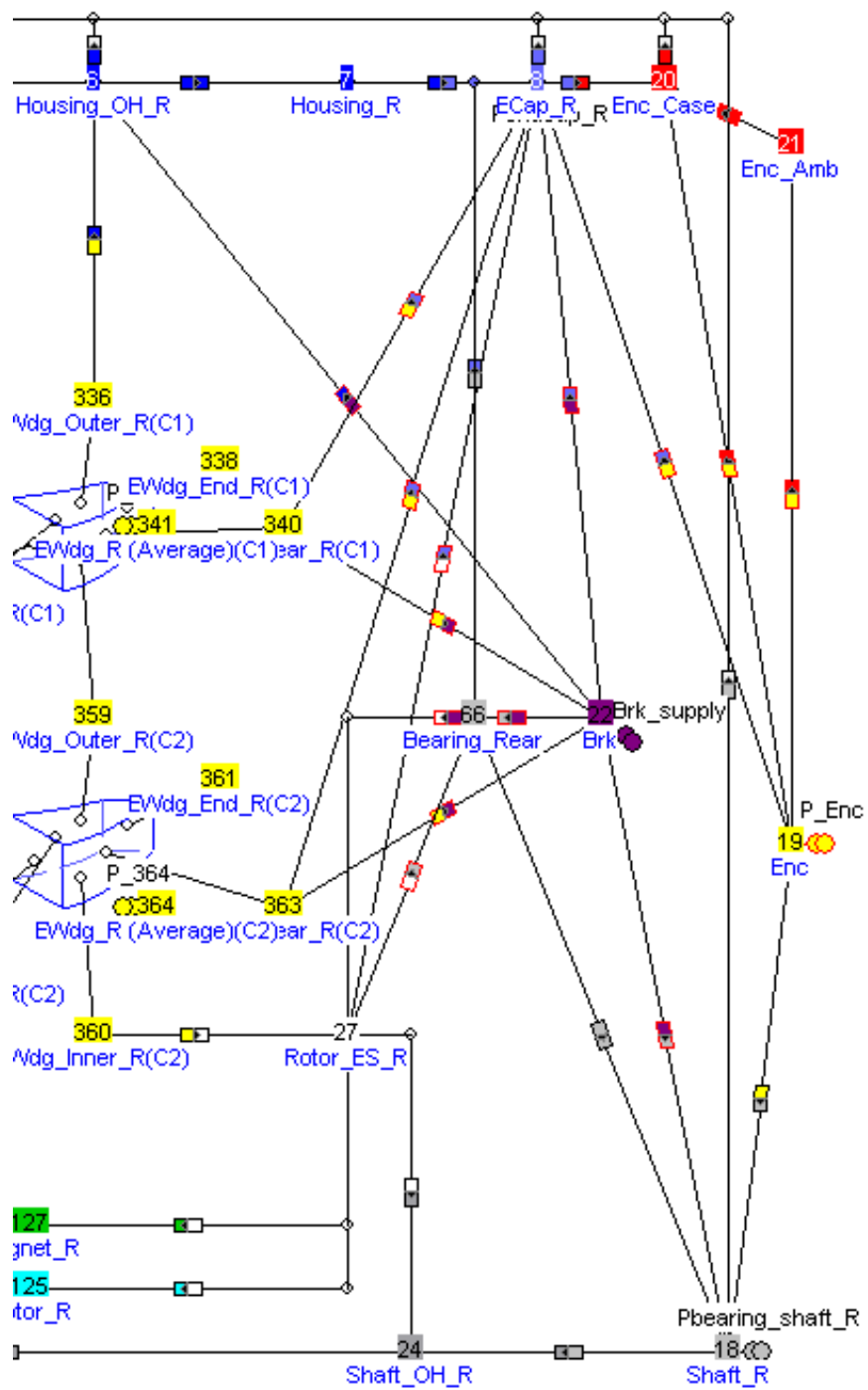
Parametry příkonů zpětnovazebního členu a brzdy byly změřeny můstkovou metodou. Hodnoty tepelných odporů, které nebyly ve výchozím schématu, byly zadány odborným odhadem a poté doladěny postupnou iterací na změřené teploty v uzlech. Hodnoty tepelných odporů a výkonů viz obr. 5.7.

Component Type	Name	Value	Node 1	Node 2
Power Injection	OpDSL	0.63	19 (Enc)	
Modify Existing Node	Enc_Case		20 (Enc_Case)	
Modify Existing Node	Enc_Amb		21 (Enc_Amb)	
Resistance	Enc_EncCase	50	21 (Enc_Amb)	20 (Enc_Case)
Modify Existing Node	Enc		19 (Enc)	
Resistance	Enc_EncCase	150	19 (Enc)	21 (Enc_Amb)
Modify Existing Node	Brk		22 (Brk)	
Resistance	Brk_Shaft	6	22 (Brk)	18 (Shaft_R)
Resistance	Brk_Ecap	0.16	22 (Brk)	8 (ECap_R)
Power Source	PBrk_supply	19.2	22 (Brk)	
Power Injection	PBrk_friction	0	22 (Brk)	
Resistance	Brk_Housing	6.7	22 (Brk)	6 (Housing_OH_R)
Resistance	Brk_Bearing_R	7	22 (Brk)	66 (Bearing_Rear)
Resistance	Enc_ECap	7	19 (Enc)	8 (ECap_R)
Resistance	Rotor_Brk	33,723828	27 (Rotor_ES_R)	22 (Brk)
Resistance	EC_ES_R	9999	8 (ECap_R)	27 (Rotor_ES_R)
Resistance	Wdg_Brk1	27	22 (Brk)	340
Resistance	R_33	9999	8 (ECap_R)	340
Resistance	Brg_ES_R	9999	27 (Rotor_ES_R)	66 (Bearing_Rear)
Resistance	Wdg_Brk2	27	22 (Brk)	363
Resistance	R_34	9999	8 (ECap_R)	363
Resistance	Enc_EncCase	9999	19 (Enc)	20 (Enc_Case)

Obr. 5.7: Hodnoty tepelných veličin upravovaných ve schématu

Tab. 5.3: Legenda zmíněných tepelných veličin pro obr. 5.7

Označení	Název
OpDSL	Příkon zpětnovazebního členu
PBrk_supply	Příkon parkovací brzdy



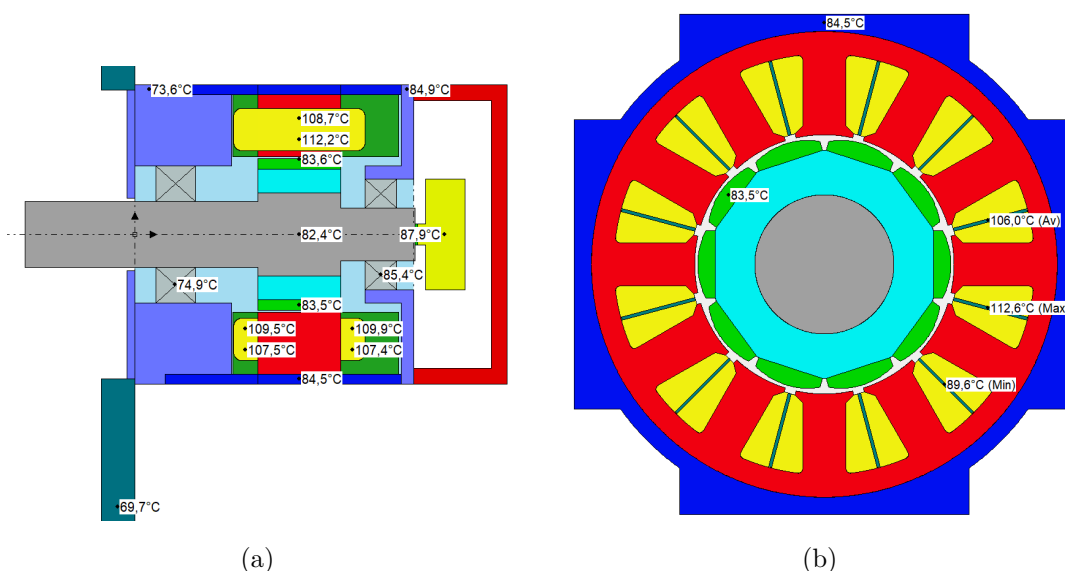
Obr. 5.8: Detail části tepelné sítě

## 5.3 Ladění tepelného modelu dle změřených hodnot

Než přišlo na řadu ladění modelu byl proveden počáteční výpočet. Na základě tohoto výpočtu byly laděny parametry k dosažení hodnot, které by se blížily k hodnotám změřeným.

### 5.3.1 Výpočet pro 200 ot./min

Pro počáteční výpočet při 200 ot./min bylo provedeno nastavení v elektromagnetickém modelu, otáčky 200 ot./min a proud 9,73 A. Dále byla zadána teplota okolí, při které byla zkouška provedena. Analýza byla poté spuštěna v režimu iterace mezi elektromagnetickým a tepelným modelem k dosažení konvergovaného řešení. Teploty na sledovaných částech z výsledku analýzy viz obr. 5.9.

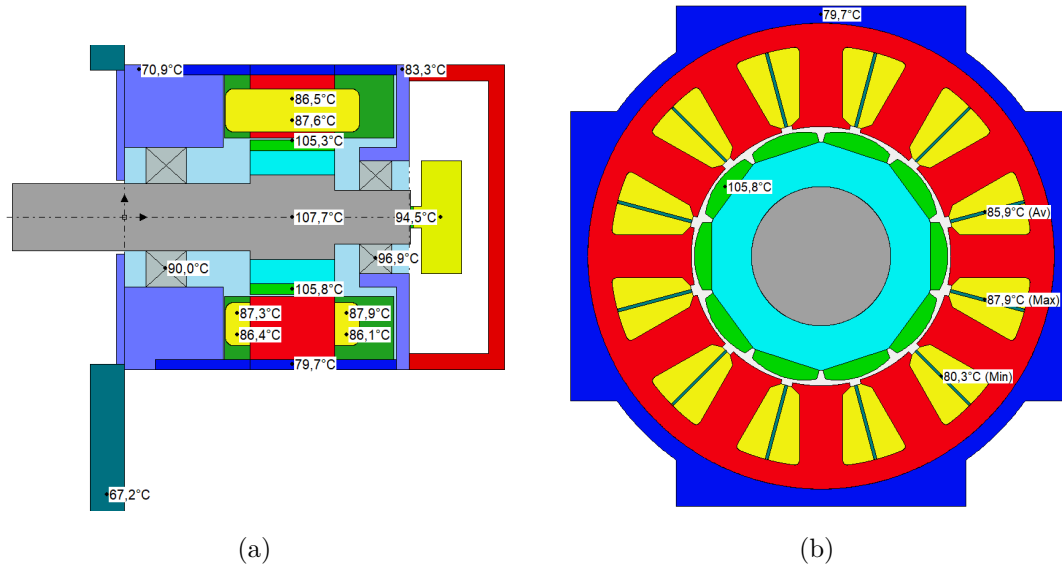


Obr. 5.9: Sledované teploty (a) axiální zobrazení (b) radiální zobrazení

Jak je vidět na obrázcích, tak teploty na sledovaných částech jsou blízko hodnotám naměřeným v kapitole 4.3. V tuto chvíli není nutné do modelu nijak zasahovat. Po elektromagnetické stránce vyšel moment na hřídeli 6,84 Nm což je o 2,24 % více než je hodnota z měření.

### 5.3.2 Výpočet pro 6000 ot./min

Nastavení pro výpočet při 6000 ot./min probíhal podobně jako u předchozího výpočtu. Proud byl nastaven na hodnotu 4,41 A. Výsledné teploty z analýzy viz obr. 5.10.

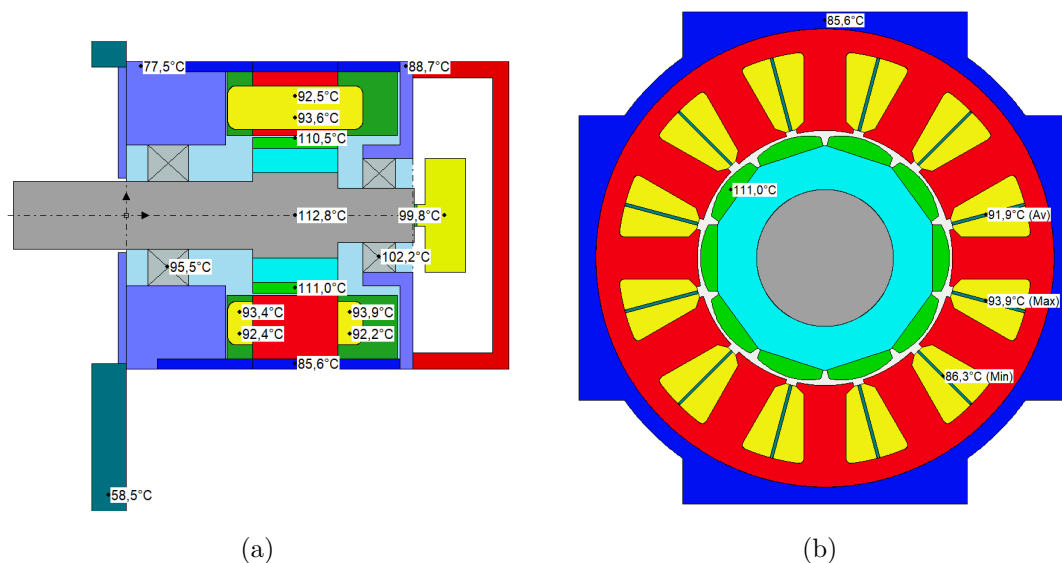


Obr. 5.10: Sledované teploty (a) axiální zobrazení (b) radiální zobrazení

Na obrázcích lze vidět, že hodnoty teplot už příliš nekorelují s hodnotami změřenými jako tomu bylo u předchozího výpočtu. Z elektromagnetické analýzy vyšel moment na hřídeli 2,94 Nm což je o 1,67 % méně než z měření. Hodnota indukovaného napětí za tepla při 1000 ot./min vyšla 42,73 V což je o 0,93 % méně než z měření. Z těchto dat vyplývá to, že remanentní indukce magnetů na měřeném motoru klesá s teplotou méně než v modelu. Úsudek je postaven na indukovaném napětí, které bylo změřené vyšší než vypočítané v modelu a to i přesto, že v modelu vychází na sledovaných částech nižší teploty. Nižší moment na hřídeli tuto teorii potvrzuje. Ačkoli by bylo možné parametr  $\alpha$  snížit, zatím bude ponechán a nejprve bude laděn tepelný model.

Z teplot, které lze vyčíst na obr. 5.10(a) a (b), lze usoudit, že změna v modelu bude nutná mezi motorem a chladicí deskou. Chladicí deska má v modelu mnohem vyšší teplotu než vyšla teplota z měření a naopak ostatní části mají teplotu nižší. Proto bylo navrženo snížit kvalitu kontaktního spoje v modelu mezi motorem a chladicí deskou. Hodnota byla snížena až na 0,0125 mm. I poté byly teploty na všech částech vyšší než z měření, a proto byla navýšena hodnota parametru  $\alpha$  (v programu značen  $h$ ) pro přirozenou konvekci chladicí desky. V parametru byl nově zohledněn přestup tepla z chladicí desky dál na testovací stanoviště přes čtyři přichycovací šrouby velikosti M12. Dále v něm bylo zohledněno ofukování chladicí desky vlivem

točící se hřídele s nasazenou spojkou. Parametr byl vynásoben hodnotou 1,5. Výsledné teploty po takto upraveném modelu viz obr. 5.11.

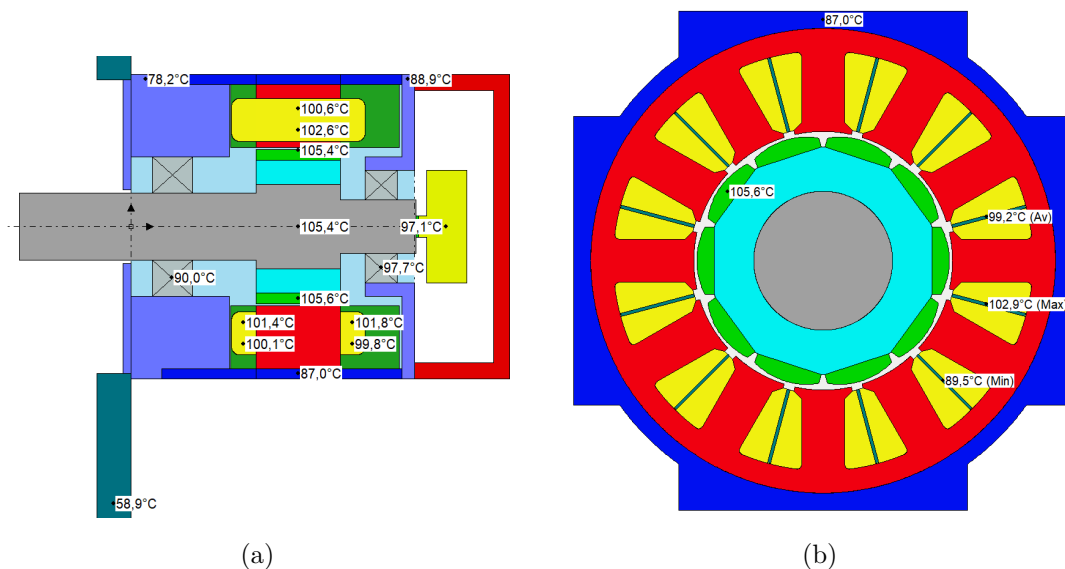


Obr. 5.11: Sledované teploty (a) axiální zobrazení (b) radiální zobrazení

Hodnoty teplot jsou již velmi blízko měřeným hodnotám. Z elektromagnetické analýzy vyšel moment na hřídeli 2,92 Nm což je o 2,34 % méně než z měření a hodnoty indukovaného napětí je 42,54 V což je o 1,37 % méně než z měření. Tento rozdíl by bylo možné dorovnat parametrem  $\alpha$  pro magnety, ale rozdíl v momentu není velký, ale je vyšší než před odladěním tepelného modelu. Napětí změřené může být reálně nižší, jelikož hodnotu indukovaného napětí naprázdno při 1000 ot./min není možné změřit nekonečně rychle po vypnutí motoru po oteplovací zkoušce. Je tedy možné, že po ukončení zkoušky došlo k částečnému ochlazení motoru (magnetů) před odečtením hodnoty, čímž se zvýšila hodnota indukovaného napětí. Rozdíl mezi teplotami je nejvyšší na chladicí desce. Zde je rozdíl 3,5 °C, vyšší teplota vyšla z analýzy.

### 5.3.3 Výpočet pro 4000 ot./min

S nastavením modelu z analýzy při 6000 ot./min byl proveden výpočet tepelného modelu při 4000 ot./min. Proud byl nastaven na hodnotu 7,01 A. Výsledné teploty viz obr. 5.12.

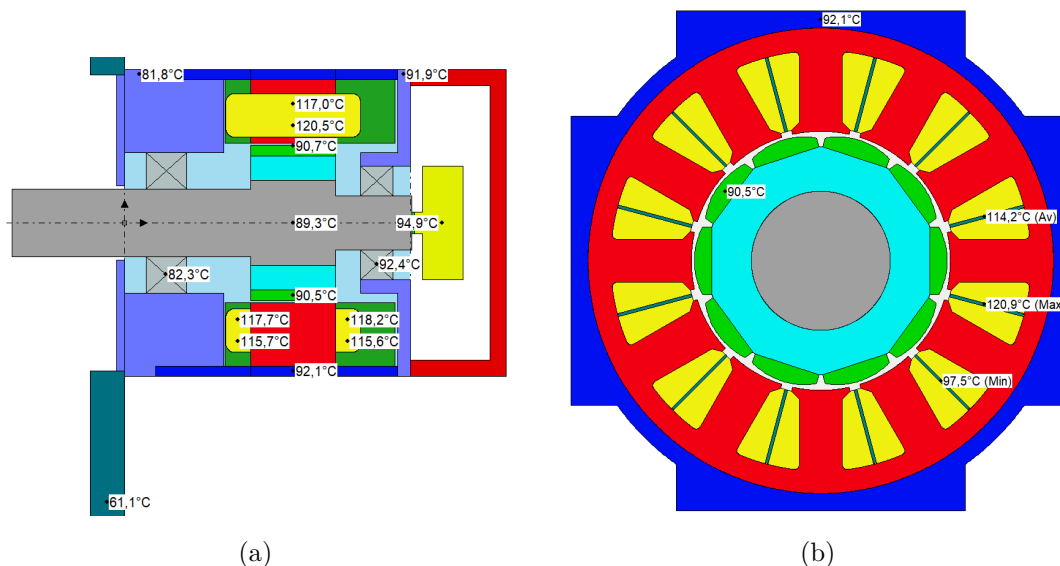


Obr. 5.12: Sledované teploty (a) axiální zobrazení (b) radiální zobrazení

Jak je vidět na obrázcích, tak největší rozdíl teplot je na vinutí o 4,5 °C. V elektromagnetickém modelu vyšel moment na hřídeli 4,78 Nm a indukované napětí 42,76 V. Rozdíl mezi výpočtem a měřením je u momentu na hřídeli 0,42 %, vyšší vyšel z výpočtu a u indukovaného napětí 0,35 %, vyšší hodnota vyšla z měření.

### 5.3.4 Kontrola pro 200 ot./min

Jelikož byla provedena změna v nastavení tepelných přestupů je potřeba provést znovu výpočet pro 200 ot./min a udělat zpětnou kontrolu teplot sledovaných částí, ty viz obr. 5.13.



Obr. 5.13: Sledované teploty (a) axiální zobrazení (b) radiální zobrazení

Z obrázků lze vidět, že rozdíl mezi změřenými teplotami a vypočtenými je vyšší než při prvním výpočtu pro 200 ot./min. Na vinutí, kde je největší rozdíl, činí jeho hodnota 4,7 °C. Rozdíl by mohl být laděn změnou parametru kvality kontaktního spoje, ale měl by vliv i na ostatní dvě analýzy, kde poměr teplot mezi motorem a chladicí deskou je opačný. Z tohoto důvodu je tento model označen jako konečný. V elektromagnetické analýze vyšel moment na hřídeli 6,81 Nm a indukované napětí 43,38 V. Rozdíl oproti změřenému momentu je 1,79 %, vyšší vyšel z analýzy.

## 5.4 Zhodnocení výsledků měření a srovnání s výpočtem

Zhodnocení výsledků bylo provedeno na základě srovnání hodnot z analýzy programu a změřených hodnot. Jsou srovnávány konečné analýzy. Rozdíl hodnot je vztažen vzhledem k změřeným hodnotám.

### Srovnání při 200 ot./min

Na pomalé otáčky vyšly rozdíly teplot mezi změřenými hodnotami a hodnotami z analýzy viz tab. 5.4. Jak je vidět, tak rozdíl nedosahuje na žádné části 5 %. Největší absolutní odchylka je na vinutí o 4,7 °C.

Tab. 5.4: Srovnání výsledných teplot 200 ot./min

Sledovaná část	Měření	Analýza Motor-CAD	Relativní odchylka
Okolí	25,6 °C	25,6 °C	0 %
Chladicí deska	62,9 °C	61,1 °C	-2,86 %
Povrch motoru	88,5 °C	92,1 °C	4,97 %
Vinutí	116,2 °C	120,9 °C	4,04 %
Zpětnovazební člen	91,3 °C	94,9 °C	3,94 %

### Srovnání při 4000 ot./min

Rozdíl mezi změřenými hodnotami a vypočtenými hodnotami teplot, je nejmenší při 4000 ot./min. Jak je vidět, tak na chladicí desce a povrchu motoru je rozdíl téměř zanedbatelný. Největší teplotní rozdíl je stejně jako u předchozí analýzy na vinutí, zde o 4,5 °C.

Tab. 5.5: Srovnání výsledných teplot 4000 ot./min

Sledovaná část	Měření	Analýza Motor-CAD	Relativní odchylka
Okolí	25,4 °C	25,4 °C	0 %
Chladicí deska	58 °C	58,9 °C	1,55 %
Povrch motoru	87,3 °C	87,0 °C	-0,34 %
Vinutí	107,4 °C	102,9 °C	-4,19 %
Zpětnovazební člen	99,5 °C	97,1 °C	-2,41 %

### Srovnání při 6000 ot./min

Při srovnání hodnot z analýzy a změřených hodnot při 6000 ot./min je procentuálně největší odchylka na chladicí desce. Ale pokud budeme brát absolutní hodnotu, tak rozdíl je na této části 3,5 °C, což je méně než největší rozdíl teplot u předchozích analýz.

Tab. 5.6: Srovnání výsledných teplot 6000 ot./min

Sledovaná část	Měření	Analýza Motor-CAD	Relativní odchylka
Okolí	25,4 °C	25,4 °C	0 %
Chladicí deska	55 °C	58,5 °C	6,36 %
Povrch motoru	83,3 °C	85,6 °C	2,76 %
Vinutí	96,7 °C	93,9 °C	-2,90 %
Zpětnovazební člen	99,9 °C	99,8 °C	-0,10 %

## 6 Návrh cizího chlazení pro servomotor

U servomotorů dochází k přirozenému chlazení pomocí konvekce a radiace na povrchu motoru. Dále je při oteplovací zkoušce nasazen na referenční chladicí desku pro danou velikost motoru, do které se odvádí teplo přes přírubu motoru principem vedení tepla. Velikost této příruby je dána mezinárodní normou IEC 72 .[15] Velikost chladicí desky, ke které se vztahují katalogové hodnoty, je uváděna v katalogu pro danou velikost motoru viz [16]. Abychom dosáhli u servomotoru vyšší zatížitelnosti je nutné zvýšit odvod tepla.

### 6.1 Možnosti cizího chlazení

Možností jak účinně chladit motor je několik. Každá z nich má své výhody a nevýhody, tedy hodí se pro jiné užití. V následujících podkapitolách bude rozebráno několik těchto možností chlazení.

#### 6.1.1 Ventilátor

Chlazení elektrického motoru pomocí ventilátoru je asi nejčastější varianta cizího chlazení. U asynchronních strojů je ventilátor běžnou součástí stroje. Jeho výhodou je nenáročná aplikace, a dobrá účinnost chlazení. Mezi nevýhody patří akustický hluk a zvýšená rychlost vzduchu v okolí ventilátoru, což může způsobit nežádoucí pohyb lehkých částí v okolí motoru.

#### 6.1.2 Kanálky pro vodní chlazení

Kanálky pro vodní chlazení jsou velmi účinnou metodou jak chladit motor. Tekutina která prochází těmito kanálky přímo ochlazuje stator a tak velmi dobře odvádí teplo, které vzniká ztrátami ve vinutí. Nevýhodou tohoto řešení je to, že aby bylo možné takto chladit motor, je nutné vytvořit tyto kanálky již při výrobě. Z tohoto důvodu je tato možnost nejméně vhodná, jelikož cílem je navrhnout chlazení na již vyrobený motor.

#### 6.1.3 Vodní chlazení povrchu motoru

Odvod tepla pomocí vodního chlazení přímo z povrchu motoru má potenciál odvést značné množství tepelných ztrát. Důvodem je velká plocha, kterou by bylo možné využít. Tato varianta by zahrnovala výměníky připevněné na povrch motoru. Nevýhodou této varianty je obtížnost připevnění těchto výměníků. Povrch motoru totiž nemá plochy, které by byly dostatečně rovné na to, aby mohlo docházet k dobrému

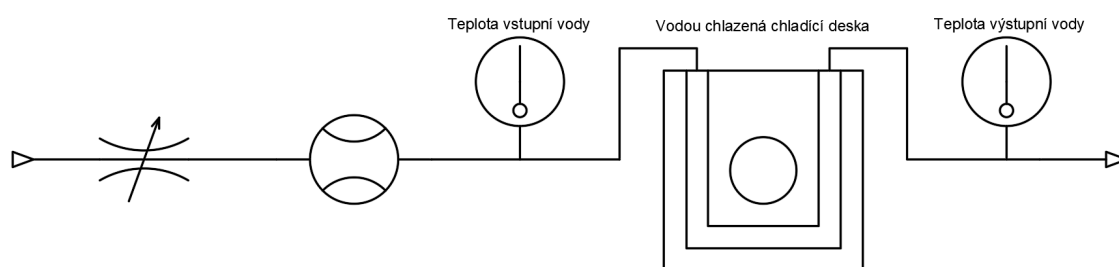
přestupu tepla. Navíc je povrch motoru opatřen lakem, který jej chrání před vlivy prostředí.

### 6.1.4 Chladicí deska s vodním chlazením

Použitím vodou chlazené chladicí desky, lze dosáhnout poměrně značného odvodu tepla, byť za cenu nerovnoměrnosti tohoto chlazení, jelikož teplo bude v tomto případě odcházet zejména z přední části motoru, zatímco ztráty vznikající v zadní části motoru budou odváděny hůře. Nicméně takto upravenou chladicí desku lze snadno upevnit na přírubu motoru, což činí variantu vodního chlazení přes přírubu jednoduše proveditelnou.

## 6.2 Návrh pracoviště se zvoleným způsobem chlazení

Z možností cizího chlazení byla vybrána varianta chladicí desky s vodním chlazením pro svou jednoduchost aplikace na již vyrobený servomotor. Byla tedy vyrobena chladicí deska s kanálky pro protékající tekutinu (vodu), která bude umístěna na přírubu motoru, místo referenční chladicí desky. Pro účely měření byla vytvořena izolační vrstva mezi vodou chlazenou chladicí desku a referenční chladicí desku, jelikož na testovací stoličce je možné motor uchytit pouze přes referenční (testovací) desku. Dále bylo pro účely měření upraveno testovací pracoviště viz obr. 6.1 tak, aby mohla být pomocí průtokoměru a ventilu nastavena a sledována hodnota průtoku. Teplota protékající vody je měřena na vstupu i výstupu z chladicí desky.



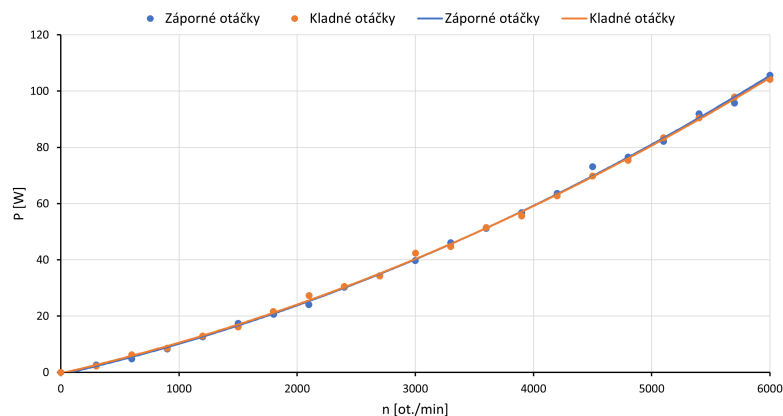
Obr. 6.1: Schématické zobrazení okruhu vodního chlazení

## 7 Výpočet a měření pro cizí chlazení

Výpočet výkonu motoru při vodou chlazené chladicí desce byl proveden na základě modelu, který byl v programu Motor-CAD odladěn v kapitole 5.3. Tento model byl upraven pro chladicí desku s vodním chlazením. Následně byla provedena oteplovací zkouška v laboratoři a výsledky byly srovnány s výpočtem.

### 7.1 Prvotní výpočet tepelného modelu s cizím chlazením

Jelikož bude motor nasazen na chladicí desku protékanou studenou vodou, bude takto odvedeno velké množství tepla z přední části motoru. To znamená, že přední ložisko bude studené a pro výpočet je potřeba zjistit ztráty naprázdno za studeného stavu motoru. Průběh ztrát za studeného stavu viz obr. 7.1.



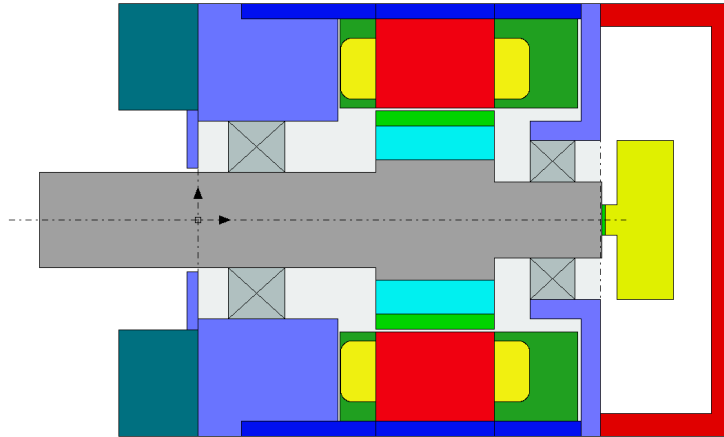
Obr. 7.1: Průběh ztrát naprázdno za studeného stavu

Do modelu byly ztráty zadány stejným způsobem jako při předchozím zadávání. Byl zachován koeficient 1,33 pro závislost ztrát na otáčkách a ztráty při 1000 ot./min byly dosazeny 10,8 W.

Dále byla v modelu upravena tepelná síť a geometrie chladicí desky. Původní chladicí deska byla nahrazena vodou chlazenou chladicí deskou, která má vnější rozměry blízké vnějším rozměrům kostry motoru viz obr. 7.2.

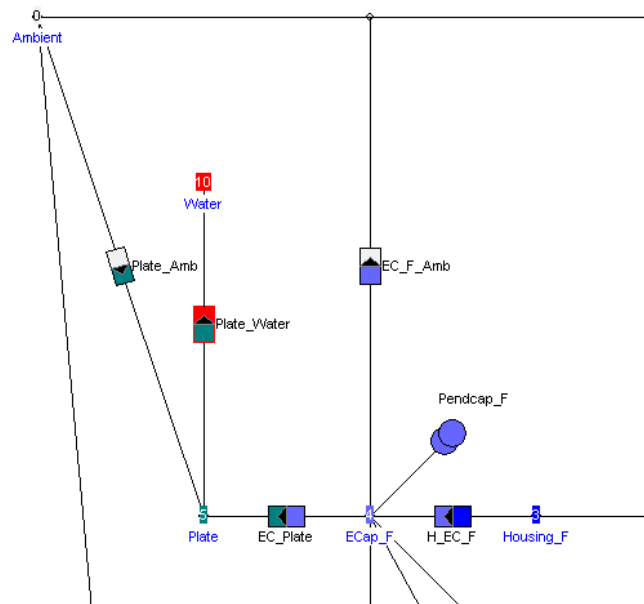
Dále byla upravena emisivita této chladicí desky. Materiál ze kterého je vyrobena bude mít, bez povrchové úpravy, emisivitu rovnou 0,2. Jelikož bude přední plocha chladicí desky zakryta izolačním materiálem, tak byla emisivita snížena poměrem ploch nezakrytých vzhledem k zakrytým. Izolační materiál bude tvořit tepelnou izolaci mezi deskou pro cizí chlazení a chladicí deskou použitou při měření bez cizího chlazení. V modelu byla na základě měření termokamerou upravena i emisivita

ostatních částí motoru na jednotnou hodnotu 0,96. Předchozí hodnota byla 0,95 a po kontrolním přepočtu modelu se hodnoty teplot na jednotlivých částech snížily o 0,1 °C. Nedošlo tedy při uvažované hodnotě emisivity 0,95 k závažné chybě. Stejným způsobem jako pro radiaci byla snížena hodnota parametru  $\alpha$  pro přirozenou konvekci chladicí desky.



Obr. 7.2: Upravená geometrie s vodou chlazenou chladicí deskou

Následně byla upravena tepelná síť jak již bylo zmíněno. Byl přidán uzel představující teplotu vody na němž byla nastavena fixní teplota. Na tento uzel byla napojena přes tepelný odpor chladicí deska viz obr. 7.3.



Obr. 7.3: Úprava tepelné sítě pro vodou chlazenou chladicí deskou

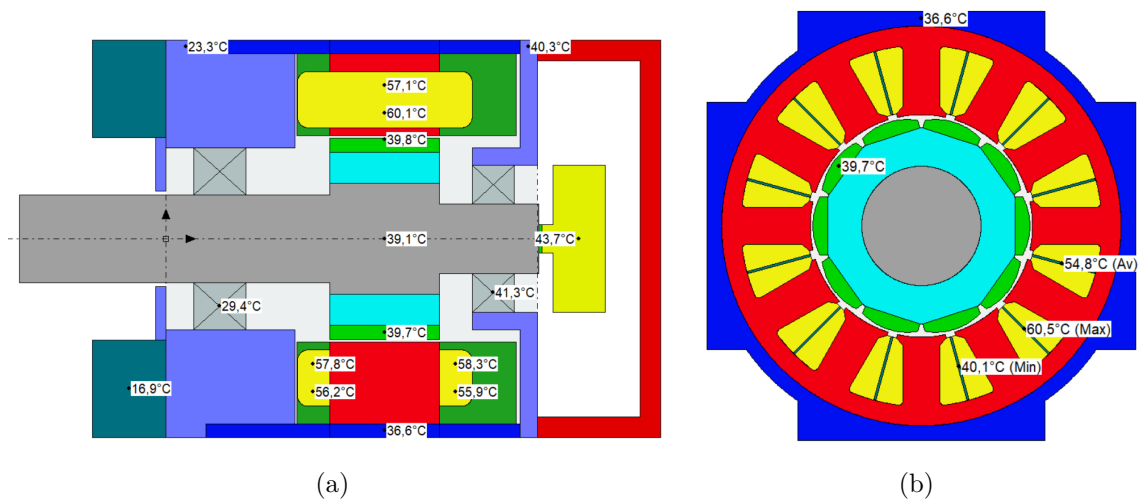
Hodnota tepelného odporu byla určena ze vztahu pro kapalinové chladiče z [14].

### 7.1.1 Výpočet pro 200 ot./min

Pro výpočet byl zprvu zvolen průtok 2 litry za minutu. Pro tuto hodnotu byl vypočten tepelný odpor mezi chladicí deskou a vodou. Měrné teplo vody  $c$  podle [14] je  $4,18 \cdot 10^3$  J/Kkg, měrná hmotnost vody  $\gamma = 1$  kg/l a průtok  $Q = \frac{2}{60}$  l/s.

$$R_{\vartheta\text{Plate\_Water}} = \frac{1}{c\gamma Q} = \frac{60}{4,18 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 2} = 7,18 \cdot 10^{-3} \text{ K/W} \quad (7.1)$$

V programu Motor-CAD byl následně proveden výpočet tepelného a elektromagnetického modelu pro 200 ot./min, proud 9,73 A a vodou chlazenou chladicí deskou. Teploty sledovaných částí motoru viz obr. 7.4.



Obr. 7.4: Sledované teploty (a) axiální zobrazení (b) radiální zobrazení

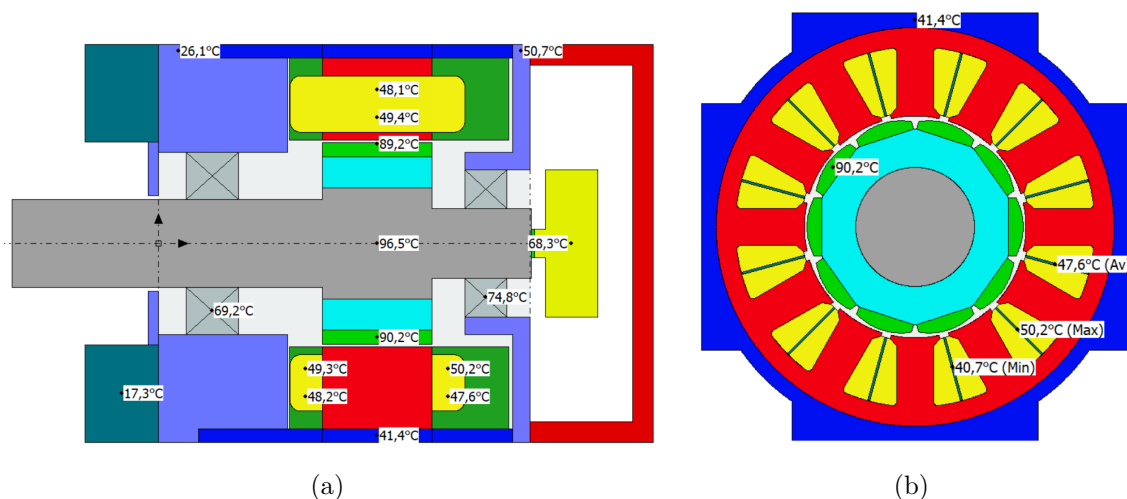
Z elektromagnetické analýzy vyšel moment na hřídeli 7,08 Nm a indukované napětí při 1000 ot./min 45,45 V. Na grafickém zobrazení modelu motoru z analýzy si lze povšimnout, jak je přední část motoru výrazně chladnější než zadní část. Pokles teploty ve vinutí oproti přirozenému chlazení je  $60,4$  °C a na zpětnovazebním členu  $51,2$  °C.

Tab. 7.1: Srovnání výsledků analýzy pro přirozené a cizí chlazení

Sledovaný parametr	Přirozené chlazení	Cizí chlazení	Rozdíl
Teplota na povrchu motoru	92,1 °C	36,6 °C	-60 %
Teplota ve vinutí	120,9 °C	60,5 °C	-50 %
Teplota zpětnovazebního členu	94,9 °C	43,7 °C	-54 %
Moment na hřídeli	6,81 Nm	7,08 Nm	4 %

## 7.1.2 Výpočet pro 6000 ot./min

Následně byla provedena tepelná analýza pro 6000 ot./min a proudové zatížení 4,41 A s vodou chlazenou chladicí deskou. Výsledné teploty z analýzy viz obr. 7.5.



Obr. 7.5: Sledované teploty (a) axiální zobrazení (b) radiální zobrazení

Zde vyšel moment na hřídeli 2,9 Nm a indukované napětí při 1000 ot./min 43,4 V.

Tab. 7.2: Srovnání výsledků analýzy pro přirozené a cizí chlazení

Sledovaný parametr	Přirozené chlazení	Cizí chlazení	Rozdíl
Teplota na povrchu motoru	85,6 °C	41,4 °C	-52 %
Teplota ve vinutí	93,9 °C	50,2 °C	-47 %
Teplota zpětnovazebního členu	99,8 °C	68,3 °C	-32 %
Moment na hřídeli	2,92 Nm	2,90 Nm	-0,7 %

Z tabulky je vidět, že teplota nejvíce poklesla na povrchu motoru stejně jako u chodu na 200 ot./min. Téměř srovnatelný pokles je na vinutí. Pokles teploty na zpětnovazebním členu je nižší, jelikož je umístěn v zadní části motoru a největší odvod tepla je uskutečňován do zadního štítu. Moment na hřídeli i přes nižší teplotu na magnetech vyšel nižší a to z důvodu vyšších ztrát v ložiscích vlivem nízké teploty.

### 7.1.3 Srovnání vypočtených hodnot se změřenými

Pro srovnání byla provedena oteplovací zkouška s vodou chlazenou chladicí deskou pro oba body, ve kterých byla provedena analýza v programu Motor-CAD.

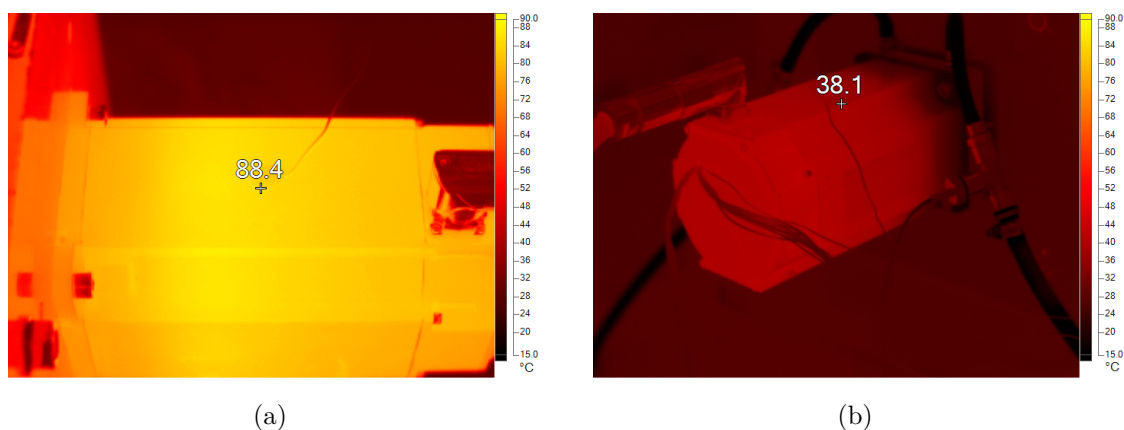
#### Srovnání při 200 ot./min

První bod byl při 200 ot./min a fázovém proudu 9,73 A. V tabulce je vidět srovnání vypočtených a změřených hodnot. Největší odchylka vznikla na zpětnovazebním členu. Jedná se o odchylku do 5 °C.

Tab. 7.3: Srovnání výsledků 200 ot./min

Sledovaná část	Analýza Motor-CAD	Změřené hodnoty	Relativní odchylka
Okolí	25 °C	25 °C	0 %
Teplota vody	16 °C	15,2 °C	-5 %
Povrch motoru	36,6 °C	38,1 °C	4,1 %
Vinutí	60,5 °C	62,1 °C	2,64 %
Zpětnovazební člen	43,7 °C	48,5 °C	11 %
Moment na hřídeli	7,08 Nm	6,97 Nm	-1,55 %

Pro porovnání byl pořízen snímek pomocí termokamery při nasazení motoru na původní chladicí desku a po nasazení na desku vodou chlazenou.



Obr. 7.6: Snímek z termokamery se značkou v bodě měření teploty povrchu motoru (a) původní deska (b) vodou chlazená deska

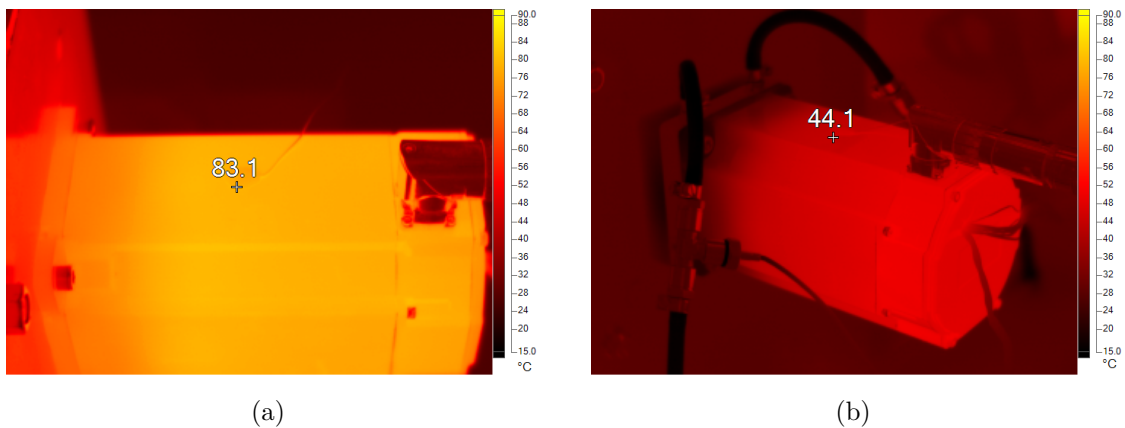
### Srovnání při 6000 ot./min

Druhý bod, pro který byla provedena oteplovací zkouška, je při 6000 ot./min a fázovém proudu 4,41 A. Z tabulky si lze všimnout, že největší odchylka vznikla na vinutí. Jedná se o odchylku okolo 5 °C, tedy podobný rozdíl jako u zpětnovazebního členu při 200 ot./min. To by mohlo značit, že ztráty zpětnovazebního členu nejsou lineárně závislé na otáčkách.

Tab. 7.4: Srovnání výsledků 6000 ot./min

Sledovaná část	Analýza Motor-CAD	Změřené hodnoty	Relativní odchylka
Okolí	25 °C	25,6 °C	2,4 %
Teplota vody	16 °C	15,3 °C	-4,38 %
Povrch motoru	41,4 °C	44,1 °C	6,52 %
Vinutí	50,2 °C	55,4 °C	10,36 %
Zpětnovazební člen	68,3 °C	72,4	6 %
Moment na hřídeli	2,90 Nm	3,04 Nm	4,83 %

Pro porovnání teploty motoru byl i zde pořízen snímek pomocí termokamery při nasazení motoru na původní chladicí desku a po nasazení na desku vodou chlazenou.



Obr. 7.7: Snímek z termokamery se značkou v bodě měření teploty povrchu motoru (a) původní deska (b) vodou chlazená deska

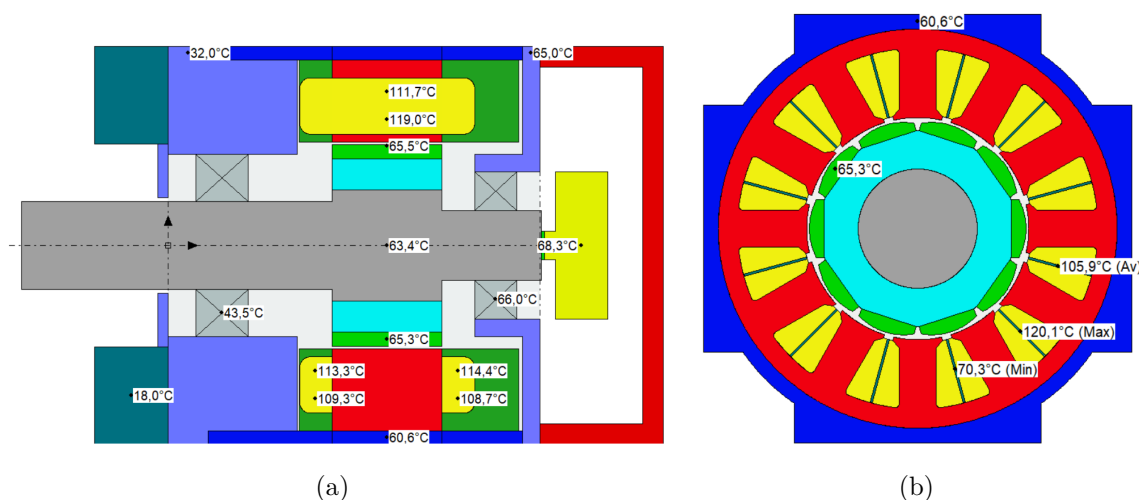
## 7.2 Výpočet pro maximální dovolené oteplení při cizím chlazení

Následně byly pomocí programu nalezeny body pro maximální dovolené oteplení na kritických částech motoru. Pro pomalý chod při 200 ot./min je touto částí vinutí, jelikož nedochází k velkým ztrátám vlivem tření ani vlivem vyšší frekvence statorových proudů. Pro nalezení bodu byl zvolen bezpečný odstup od maximální dovolené teploty ve vinutí a to o 5 °C, jelikož takto velká odchylka byla při srovnání modelu se změřenými teplotami pro prvotní výpočet.

Stejným způsobem byl nalezen bod pro jmenovité otáčky motoru (6000 ot./min). Kritickou částí je zpětnovazební člen, jelikož při vyšších otáčkách dochází k vyšším ztrátám vlivem tření a vlivem frekvence statorových proudů. To znamená, že rotor je výrazně teplejší než při pomalém chodu a ztráty ze zpětnovazebního členu jsou hůře odváděny pryč. Teplotní rezerva pro nalezený bod byla zvolena stejně jako pro předchozí bod 5 °C, ale pro zpětnovazební člen.

### 7.2.1 Výpočet pro 200 ot./min

V programu Motor-CAD byl proveden výpočet tepelného a elektromagnetického modelu pro 200 ot./min, proud 14,17 A a přírubu chlazenou protékající vodou. Teploty sledovaných částí motoru viz obr. 7.8.

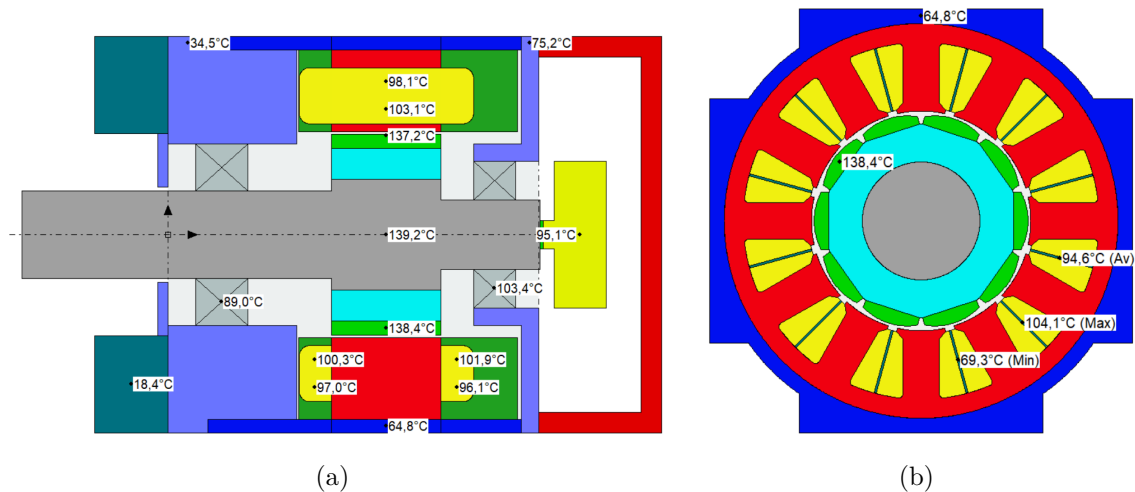


Obr. 7.8: Sledované teploty (a) axiální zobrazení (b) radiální zobrazení

Z elektromagnetické analýzy vyšel moment na hřídeli 9,89 Nm a indukované napětí při 1000 ot./min 44,62 V.

## 7.2.2 Výpočet pro 6000 ot./min

Stejným způsobem jako pro 200 ot./min byl proveden výpočet tepelného a elektromagnetického modelu pro 6000 ot./min, proud 11 A a přírubu chlazenou protékající vodou. Teploty sledovaných částí motoru viz obr. 7.9.



Obr. 7.9: Sledované teploty (a) axiální zobrazení (b) radiální zobrazení

Z elektromagnetické analýzy vyšel moment na hřídeli 7,19 Nm a indukované napětí při 1000 ot./min 41,95 V. Na axiálním zobrazení lze vidět, jak teplota povrchu motoru roste se vzdáleností od příruby vodního chlazení. Oproti analýze při 200 ot./min je možné si povšimnout vyšší teploty magnetů oproti vinutí. Lze si také všimnout, že ložiska dosahují teploty jako při přirozeném chlazení. To znamená, že ztráty v ložiscích by mohli odpovídat ztrátám za tepla, ale pro výpočet zůstane použita kritičtější varianta se ztrátami v ložiscích za studena.

### 7.2.3 Srovnání vypočtených hodnot se změřenými

Pro srovnání s vypočtenými hodnotami byla provedena oteplovací zkouška pro oba body, ve kterých byla provedena analýza.

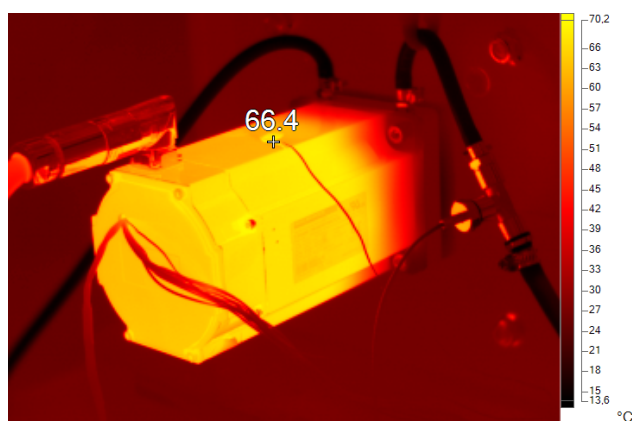
#### Srovnání při 200 ot./min

První bod je při 200 ot./min a proudu 14,17 A. Průtok byl nastaven pomocí průtokoměru na 2 litry za minutu. Po ustálení teplot byl proveden odečet těchto teplot viz tab. 7.5.

Tab. 7.5: Srovnání výsledků 200 ot./min

Sledovaná část	Analýza Motor-CAD	Změřené hodnoty	Relativní odchylka
Okolí	25 °C	25 °C	0 %
Teplota vody	16 °C	16,9 °C	5,63 %
Povrch motoru	60,6 °C	66,5 °C	9,74 %
Vinutí	120,1 °C	123,7 °C	3 %
Zpětnovazební člen	68,3 °C	74 °C	8,35 %
Moment na hřídeli	9,89 Nm	9,45 Nm	-4,45 %

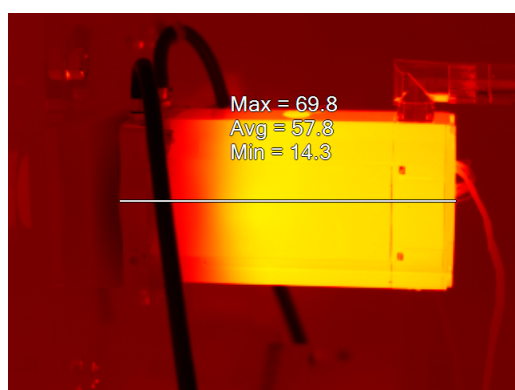
V tabulce jsou vyčísleny relativní odchylky změřených hodnot oproti analýze. Teplota vody je vyčíslena jako průměr teploty vstupní a výstupní vody. Teplota ve vinutí mírně přesáhla výpočet, zvolit si 5 °C rezervu byla dobrá volba. Teploty změřené jsou obecně vyšší než vypočtené, což může být způsobeno jak nedokonalostí samotného modelu, tak faktem, že teplota vody byla při měření vyšší než uvažovaná. Jelikož je motor a jeho části teplejší, tak to má vliv i na moment, který je nižší.



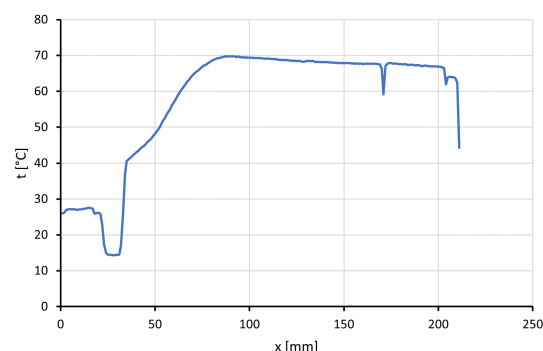
Obr. 7.10: Snímek z termokamery se značkou v bodě měření teploty povrchu motoru

Teplota povrchu motoru byla také odečtena pomocí termokamery viz obr. 7.10. Je vidět malá odchylka od hodnoty změřené pomocí termočlánku. Dále je na obr. 7.11

vidět rozložení teploty na povrchu motoru podél osy hřídele, u kterého je bohužel v záběru hadice vodního chlazení (zjištěno až při vyhodnocování). Začátek křivky představuje chladicí desku protékanou vodou, která ovšem nemusí mít teplotu odpovídající v grafu, jelikož má povrch příruby odlišnou emisivitu od povrchu motoru. Následný propad je způsoben výše zmíněným částečným zakrytím motoru připojenou hadicí viz obr. 7.11(a). Následuje nárůst teploty, blíží se k hodnotě 70 °C. Od vzdálenosti 100 mm od počátku úsečky je vidět mírný pokles teploty, jelikož nejvyšší teplota na povrchu je způsobena vinutím, které se nachází v přední části motoru. Další propady křivky jsou způsobeny přechody mezi jednotlivými částmi motoru.



(a)



(b)

Obr. 7.11: (a) Snímek z termokamery (b) rozložení teploty na úsečce

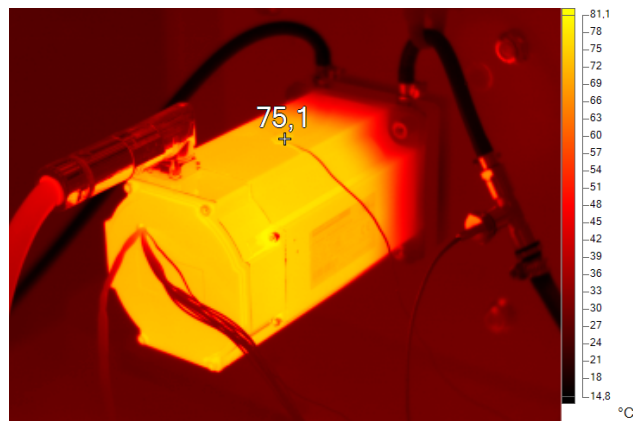
### Srovnání při 6000 ot./min

Pro srovnání při 6000 ot./min byl nalezen proud 11 A, tak aby teplota na zpětnovazebním členu nepřesáhla maximální dovolenou. Porovnání změřených hodnot s analýzou v programu viz tab. 7.6.

Tab. 7.6: Srovnání výsledků 6000 ot./min

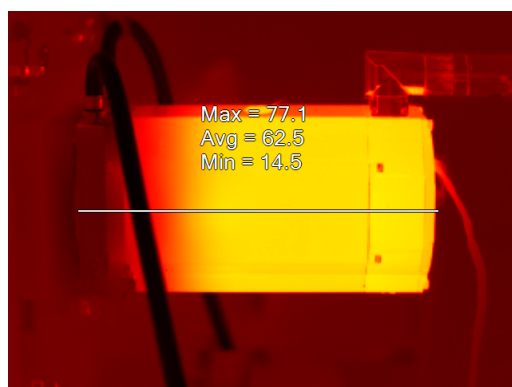
Sledovaná část	Analýza Motor-CAD	Změřené hodnoty	Relativní odchylka
Okolí	25 °C	25,1 °C	0,4 %
Teplota vody	16 °C	15,6 °C	-2,5 %
Povrch motoru	64,8 °C	75,5 °C	16,51 %
Vinutí	104,1 °C	115,4 °C	10,85 %
Zpětnovazební člen	95,1 °C	97,5 °C	2,52 %
Moment na hřídeli	7,19 Nm	7,14 Nm	-0,7 %

Porovnání ukázalo, že omezení z hlediska teploty na zpětnovazebním členu je téměř optimální a od výpočtu má jen malou odchylku. Naopak teplota ve vinutí a povrchu motoru vyšla asi o 10 °C vyšší než bylo očekáváno podle analýzy. Zdrojem této chyby bude nastavení vinutí, které má přímý vliv na stator, který je vsazen do kostry motoru. Vyšší teplota ve vinutí tedy přímo ovlivňuje teplotu na povrchu motoru. Moment vyšel téměř totožný s analýzou, z čehož je možné konstatovat, že magnety mají téměř stejnou teplotu jako v modelu.

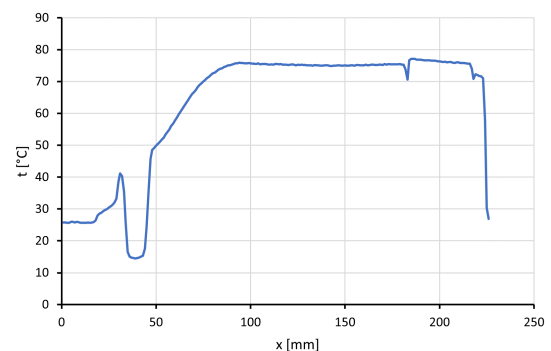


Obr. 7.12: Snímek z termokamery se značkou v bodě měření teploty povrchu motoru

I pro tuto oteplovací zkoušky byla odečtena teplota povrchu pomocí termokamery viz obr. 7.12. I zde je vidět menší odchylka od záznamu teploty z termočláňku. Následně je vidět na obr. 7.13 rozložení teploty na povrchu motoru pro lepší vizuální představu tohoto rozložení. Oproti zatěžování motoru při 200 ot./min je vidět, že teplota na povrchu od vzdálenosti 100 mm je téměř konstantní. To jen potvrzuje skutečnost chladnějšího vinutí a vyšší tepelné ztráty v ložiscích a zpětnovazebního členu.



(a)

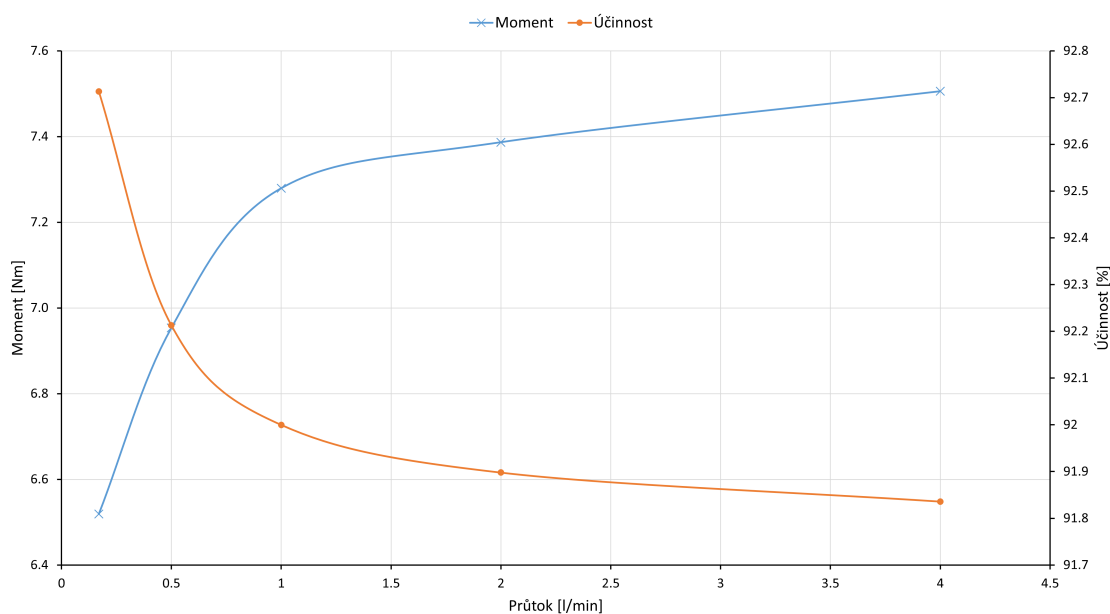


(b)

Obr. 7.13: (a) Snímek z termokamery (b) rozložení teploty na úsečce

## 7.3 Studie pro různý průtok kapaliny chladící deskou

V předchozích kapitolách pro cizí chlazení byla uvažována hodnota průtoku vody 2 litry za minutu. Aby bylo možné lépe posoudit vliv chlazení motoru přes vodou chlazenou chladící deskou, byla provedena studie vlivu průtoku na parametry motoru. Oteplovací zkoušky byly provedeny pro ustálené oteplení na zpětnovazebním členu 100 °C a ve vinutí 125 °C (byla provedena nová oteplovací zkouška i pro 2 litry za minutu). Těmito parametry jsou dosažitelný výkon, moment, účinnost a účinník. Pracovními otáčkami je 6000 ot./min.



Obr. 7.14: Závislost dosažitelného momentu a účinnosti na průtoku

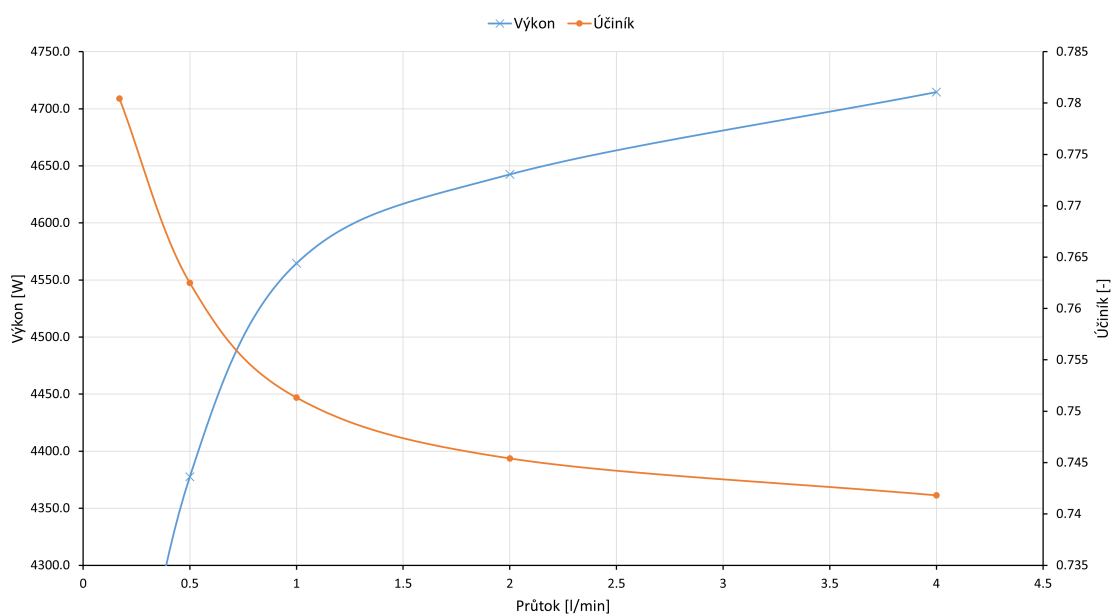
Na obr. 7.14 lze vidět závislost dosažitelného momentu a účinnosti motoru na průtoku vody chladící deskou. Pokud zvyšujeme průtok, tak motor dokáže odvést více tepla do vody a moment na hřídeli může být vyšší. Naopak to jde s účinností motoru, jelikož se s vyšším zatížením zvyšují Jouleovy ztráty ve vinutí, vlivem vyššího fázového proudu. Malý vliv může mít i chladnější přední ložisko (vlivem nerovnoměrného chlazení), které tak generuje vyšší ztráty.

Stejnou závislost na průtoku vody vykazuje dosažitelný výkon, jelikož je přímo úměrný momentu při neměnicích se otáčkách motoru. Rozdíl mezi dosažitelným výkonem při průtoku 0,17 litru za minutu a při 4 litrech za minutu je 621 W. Pokud bychom srovnali dosažitelný výkon motoru před zavedením cizího chlazení a následně po jeho zavedení, můžeme vidět nárůst výkonu v následující tabulce.

Tab. 7.7: Srovnání parametrů motoru v závislosti na chlazení

Chlazení	Výkon	Navýšení výkonu	Účinnost
Přirozené	1878,7 W	–	94,0 %
0,17 litru za minutu	4093,9 W	+118 %	92,7 %
0,5 litru za minutu	4377,7 W	+133 %	92,2 %
1 litr za minutu	4564,6 W	+143 %	92,0 %
2 litry za minutu	4642,5 W	+147 %	91,9 %
4 litry za minutu	4714,6 W	+151 %	91,8 %

Jak je vidět z tabulky, tak i velmi malý průtok má velký vliv na dosažitelný výkon motoru. Co se týče nastavení průtoku, tak při 1 litru za minutu má servomotor velký nárůst dosažitelného výkonu oproti přirozenému chlazení, ale nejedná se o tak velký průtok vody jako při 2 litrech za minutu. Na obr. 7.15 je vidět, že se nachází v přechodné oblasti charakteristiky, při menším průtoku relativně strmě klesá dosažitelný výkon a při vyšším průtoku se již tento výkon tak skokově nemění. Proto bych zvolil 1 litr za minutu pracovním průtokem jako kompromis mezi dosažitelným výkonem a nároky na chladicí systém (čerpadlo, chladicí výkon výměníku).



Obr. 7.15: Závislost dosažitelného výkonu a účinníku na průtoku

## 8 Vyhodnocení přínosu cizího chlazení

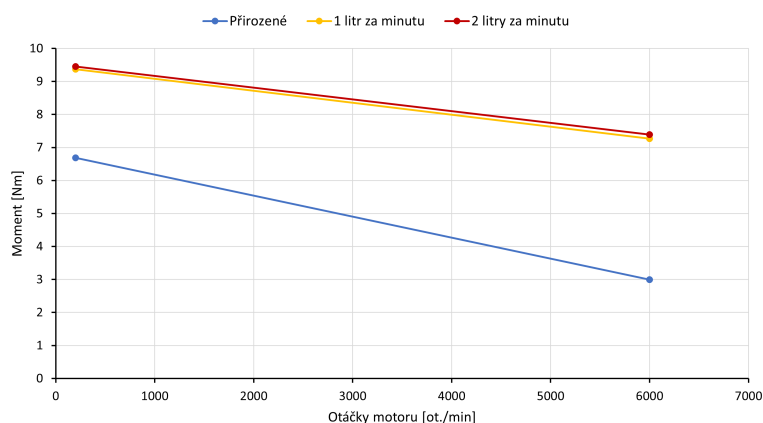
V práci byl vytvořen model servomotoru v programu Motor-CAD, který byl analyzován jak pro přirozené chlazení, tak i při cizím chlazení. V této kapitole bude vyhodnocen vliv chlazení na elektromagnetické parametry a také na teplotní model.

### 8.1 Elektromagnetické srovnání

Srovnání maximálního dosažitelného výkonu motoru při přirozeném chlazení a při nasazení na vodou chlazenou přírubu je již v kapitole, která se zabývá studií pro různý průtok kapaliny chladicí deskou viz tab. 7.7. Není ale zmíněn rozdíl mezi dosažitelným momentem při nízkých otáčkách. Ten je vidět viz tab. 8.1.

Tab. 8.1: Srovnání dosažitelného momentu na hřídeli v závislosti na chlazení

Chlazení	Dosažitelný moment při 200 ot./min	Navýšení
Přirozené	6,68 Nm	–
1 litr za minutu	9,37 Nm	+40 %
2 litry za minutu	9,45 Nm	+42 %
Chlazení	Dosažitelný moment při 6000 ot./min	Navýšení
Přirozené	2,99 Nm	–
0,17 litru za minutu	6,52 Nm	+118 %
0,5 litru za minutu	6,97 Nm	+133 %
1 litr za minutu	7,26 Nm	+143 %
2 litry za minutu	7,39 Nm	+147 %
4 litry za minutu	7,50 Nm	+151 %



Obr. 8.1: Závislost momentu na otáčkách motoru pro různá chlazení

## 8.2 Teplotní srovnání

Srovnání z hlediska teplotní analýzy přináší představu o odvedených tepelných ztrátách do chladicí vody. Pro jejich výpočet bude použita rov. 7.1 a rozdíl vstupní a výstupní teploty vody. Srovnávanými parametry viz tab. 8.2 jsou tedy teploty vstupní a výstupní vody a odvedený tepelný ztrátový výkon.

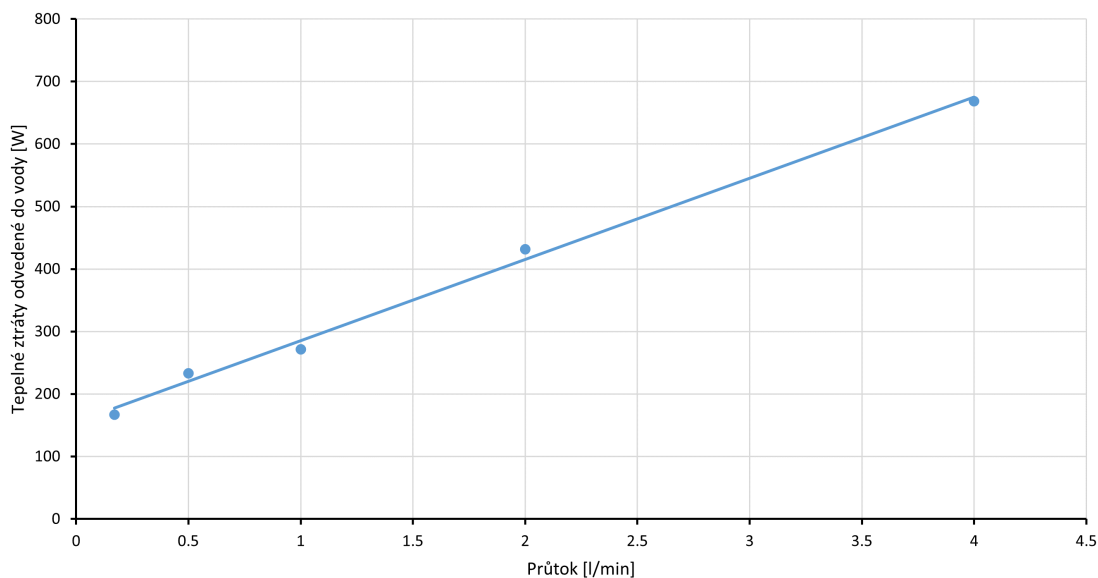
Příklad výpočtu tepelných ztrát odvedených do vody pro průtok 1 l/min. Parametry do rovnice kromě průtoku a rozdílu teplot jsou z kapitoly 7.1.1.

$$P_{H_2O} = \Delta\vartheta c\gamma Q = (18,7 - 14,8) \cdot 4,18 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot \frac{1}{60} = 271,7 \text{ W} \quad (8.1)$$

Tab. 8.2: Srovnání odvedených tepelných ztrát do chladicí vody při 6000 ot./min

Průtok vody	Vstupní teplota	Výstupní teplota	Ztráty odvedené do vody
0,17 l/min	17,3 °C	31,4 °C	167,0 W
0,5 l/min	15,4 °C	22,1 °C	233,4 W
1 l/min	14,8 °C	18,7 °C	271,7 W
2 l/min	14,0 °C	17,1 °C	431,9 W
4 l/min	14,1 °C	16,5 °C	668,8 W

Na obr. 8.2 lze vidět, že závislost odvedených tepelných ztrát do chladicí vody na průtoku má lineární charakter. Čím je vyšší průtok, tím více ztrát je odvedeno.



Obr. 8.2: Závislost odvedených tepelných ztrát do vody na průtoku

Změřená teplota ve vinutí, zmíněná v následující tabulce společně s fázovou hodnotou proudu, umožňuje dopočítat Jouleovy ztráty ve vinutí. Pro tento výpočet je nutná znalost parametrů vinutí a jeho odporu při referenční teplotě. Poté lze dopočítat tyto ztráty viz příklad pro průtok 1 l/min rov. 8.2.

$$P_j = \frac{3}{2} \cdot I_f^2 \cdot R_{25,1} \cdot (1 + \alpha_R \cdot (124,2 - 25,1)) \quad (8.2)$$

$$P_j = \frac{3}{2} \cdot 11,31^2 \cdot 0,7484 \cdot (1 + 0,003862 \cdot (124,2 - 25,1)) = 198,5 \text{ W}$$

Tab. 8.3: Srovnání Jouleových ztrát ve vinutí při 6000 ot./min

Průtok vody	Fázová hodnota proudu	Teplota ve vinutí	Jouleovy ztráty
0,17 l/min	10,06 A	124,3 °C	157,1 W
0,5 l/min	10,82 A	124,3 °C	181,8 W
1 l/min	11,31 A	124,2 °C	198,5 W
2 l/min	11,52 A	124,1 °C	205,9 W
4 l/min	11,72 A	123,9 °C	212,9 W

## Závěr

Na začátku této diplomové práce je krátké seznámení se servomotory a jejich částmi. Dále práce pokračuje seznámením se s kritickými částmi z hlediska tepelného modelu. Navazující kapitola se věnuje možnostem přestupů tepla, kde je rozebrána kondukce, konvekce a radiace. Poté následuje představení programové podpory Motor-CAD.

Praktická část této semestrální práce se věnuje vytvoření tepelného modelu vybraného servomotoru. Pro jeho vytvoření a následné ladění byly provedeny oteplovací zkoušky při různých otáčkách hřídele. Model byl následně vytvořen v programu Motor-CAD. Byl proveden výpočet a následné ladění pro elektromagnetický a tepelný model. Vytvoření elektromagnetického a tepelného modelu nepředstavovalo za pomoci programové podpory velkou časovou náročnost. Naopak tomu bylo u samotného ladění, pro které bylo důležité mít kvalitní a ověřená vstupní data. Model byl nejdříve laděn pro elektromagnetický výpočet, kde se srovnávala hodnota odporu mezi fázemi a hodnota indukovaného napětí naprázdno při 1000 ot./min. Dále byl srovnáván moment na hřídeli a indukované napětí při zahřátém motoru, to ale až iteračně s tepelným výpočtem. Tepelný model byl zprvu upraven, tak aby měl správnou odezvu na oteplení od zpětnovazebního členu a elektromagnetické brzdy. Následně probíhalo ladění pro tři různé otáčky na hřídeli. Mezi jednotlivými analýzami byly objeveny závislosti, které měli protichůdný charakter. Model byl tedy iteračně laděn, tak aby bylo dosaženo nejlepšího možného výsledku.

Práce pokračuje srovnáním změřených a vypočtených hodnot z programu při přirozeném chlazení viz kapitola 5.4. Největší rozdíl mezi teplotami změřenými a vypočtenými vznikl na vinutí při analýze pro 200 ot./min. Tato absolutní odchylka je 4,7 °C (4,04 %). Ostatní odchylky se pohybují do 5 % s výjimkou odchylky na chladicí desce pro analýzu při 6000 ot./min, kde je absolutní odchylka 3,5 °C (6,36 %). Z hlediska elektromagnetické analýzy byl laděn moment na hřídeli a indukované napětí naprázdno při 1000 ot./min. Relativní odchylka pro moment na hřídeli byla nejvyšší při analýze pro 6000 ot./min, kde dosáhla 2,34 %. U indukovaného napětí byla rovněž nejvyšší odchylka při analýze pro 6000 ot./min, zde dosáhla 1,37 %.

Následující kapitoly se začínají věnovat samotnému návrhu cizího chlazení servomotoru. Byly zhodnoceny možnosti cizího chlazení a následně byla vybrána nejvhodnější z nich pro toto zadání. Vybranou možností je chladicí deska s vodním chlazením. Bylo navrženo měřicí pracoviště s touto variantou chlazení, které umožňuje sledování a nastavení průtoku kapaliny a měření vstupní a výstupní teploty chladicí vody.

Pro takto navržené pracoviště byl upraven model v programu Motor-CAD a byla provedena analýza pro zatížení stejné jako při přirozeném chlazení. Výsledky

byly v této kapitole srovnány s výsledky analýzy při přirozeném chlazení. Následně byla provedena oteplovací zkouška, která byla srovnána s výsledky z analýzy. Rozdíly mezi výpočtem a měřením byly relativně větší než při srovnání pro přirozeného chlazení. Nicméně byly pomocí tohoto modelu nalezeny body zatížení pro maximální dovolené oteplení při 200 ot./min a 6000 ot./min. Jelikož je při tomto typu chlazení zajištěn lepší odvod ztrát z vinutí, je možné motor momentově více zatížit. Zvýšenou pozornost si ale vyžadují permanentní magnety na rotoru, u kterých by mohlo, vlivem jejich vyšší teploty a intenzity magnetického pole od vinutí, dojít k nevratné demagnetizaci. Zjištění teploty v magnetech bylo provedeno mimo tuto práci a to pomocí nepřímé metody na základě indukovaného napětí při 1000 ot./min. Všechny následující body zatížení jsou ověřeny na možnou demagnetizaci, ke které ani u jednoho z nich nedošlo. Po provedení oteplovací zkoušky byly znovu výsledky srovnány v tabulce a bylo vytvořeno grafické zobrazení rozložení teploty na povrchu motoru na základě snímku z termokamery.

Ke konci práce se nachází studie možností různých průtoků chladící kapaliny. Je v ní zhodnocen vliv průtoku na dosažitelný výkon servomotoru a jeho účinnost. Následně byl vyhodnocen průtok 1 l/min jako určitý kompromis mezi dosažitelným výkonem a nároky na chladící systém. V poslední kapitole je zhodnocení přínosu cizího chlazení pro servomotor. Je zde srovnání dosažitelných momentů pro změřené oteplovací zkoušky a velikost odvedených tepelných ztrát do chladící kapaliny pro různé průtoky. Vliv cizího chlazení servomotoru byl v práci vyhodnocen jako velmi přínosný a z hlediska aplikace na již vyrobený motor jednoduše aplikovatelný.

# Literatura

- [1] Kollmorgen S.r.o. *Kollmorgen S.r.o.* [online]. [cit. 2021-10-28]. Dostupné z: <https://www.kollmorgen.com/en-us/>
- [2] Engineering Choice *What Is Servo Motor?- Definition, Working, And Types* [online]. [cit. 2021-12-10]. Dostupné z: <https://www.engineeringchoice.com/servo-motor/>
- [3] ŠTĚPÁNKOVÁ, Milena. *Permanentní magnety: Co je třeba vědět o magnetech* [online]. [cit. 2022-01-06]. Dostupné z: <https://adoc.pub/permanentni-magnety-co-je-teba-vdt-o-magnetech.html>
- [4] Super magnete *What temperatures can magnets withstand?* [online]. Gottmadingen, Germany [cit. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://www.supermagnete.de/eng/faq/What-temperatures-can-magnets-withstand#pu421>
- [5] Arnold magnetic technologies *Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets N45H* [online]. Rochester, NY ,Rev. 210607 [cit. 2021-11-01]. Dostupné z: <https://www.arnoldmagnetics.com/wp-content/uploads/2017/11/N45H-151021.pdf>
- [6] Bomatec *Resolver* [online]. Höri, Switzerland [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: <https://www.bomatec.com/en/products/resolvers/>
- [7] Heidenhain *Rotary Encoders* [online]. Traunreut, Germany [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: [https://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/349529-2M\\_Rotary\\_Encoders\\_en\\_WEB.pdf#page=32](https://www.heidenhain.cz/fileadmin/pdb/media/img/349529-2M_Rotary_Encoders_en_WEB.pdf#page=32)
- [8] SKF *Temperature limits* [online]. Göteborg, Sweden [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/temperature-limits>
- [9] SKF *Technical Specification of Shaft Seals* [online]. Göteborg, Sweden [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.skf.com/my/products/industrial-seals/power-transmission-seals/radial-shaft-seals/technical-specification>
- [10] Matrix International *Servo Motor Brakes* [online]. Angus, Scotland UK [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://docs.rs-online.com/b6be/A700000006488334.pdf>

- [11] HW.CZ *Měření teploty - polovodičové odporové senzory teploty* [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>
- [12] Epcos *Overcurrent protection PTC* [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: [https://www.tme.eu/Document/a747cef2cf3909cffc87d9417091b0e6/OC\\_Lead\\_ed\\_230V\\_C\\_B598.pdf](https://www.tme.eu/Document/a747cef2cf3909cffc87d9417091b0e6/OC_Lead_ed_230V_C_B598.pdf)
- [13] VLACH, Radek. *Chlazení elektrických strojů* Brno.
- [14] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky: Tepelné jevy, činný výkon*. Svazek I. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FEKT, UVEE, 2005.
- [15] Kollmorgen S.r.o. *IEC Frame Size* [online]. [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.kollmorgen.com/en-us/developer-network/iec-frame-size/>
- [16] Kollmorgen S.r.o. *AKM Servo Motor Selection Guide with AKD Servo Drive Systems* [online]. 2017 [cit. 2022-04-19]. Dostupné z: <https://www.kollmorgen.com/onlinebooks/akm/mobile/index.html>

## Seznam symbolů a zkratek

<b>BPM</b>	bezkartáčový motor s permanentními magnety
<b>DC</b>	stejnoseměrný
<b>DSL</b>	digitální účastnická linka
<b>EC</b>	elektricky komutovaný
<b>FEA</b>	konečně prvková analýza
<b>IEC</b>	mezinárodní elektrotechnická komise
<b>NdFeB</b>	neodym–železo–bor
<b>NTC</b>	negativní teplotní součinitel
<b>PMSM</b>	synchronní motor s permanentními magnety
<b>Pt</b>	platina
<b>PTC</b>	pozitivní teplotní součinitel
<b>SmCo</b>	samarium–kobalt
$2p$	počet pólů stroje
$B$	magnetická indukce
$B_r$	remanentní indukce
$c$	měrné teplo vody
$H$	intenzita magnetického pole
$H_{cb}$	koercitivní síla
$J$	magnetická polarizace
$I_f$	hodnota fázového proudu
$k_E$	napěťová konstanta motoru
$L_d$	indukčnost v ose d (podélná)
$L_q$	indukčnost v ose q (příčná)
$n_x$	otáčky na hřídeli, při kterých jsou ztráty rovny $P_x$

$n_{\text{ref}}$	otáčky na hřídeli, při kterých jsou ztráty rovny $P_{\text{ref}}$
$P_{\text{H}_2\text{O}}$	ztráty odvedené do vody
$P_j$	Jouleovy ztráty
$P_k$	tepelný výkon přenesený konvekcí
$P_{\text{ref}}$	výkonové ztráty při otáčkách na hřídeli $n_{\text{ref}}$
$P_v$	tepelný výkon přenesený vedením
$P_x$	výkonové ztráty při otáčkách na hřídeli $n_x$
$P_z$	tepelný výkon přenesený zářením
$Q$	průtok
$R_{25,1}$	odpor vinutí při 25,1 °C
$R_{\vartheta\text{Plate\_Water}}$	tepelný odpor mezi chladicí deskou a vodou
$S$	plocha
$T$	termodynamická teplota
$T_a$	teplota okolí
$T_w$	teplota stěny
$T_{w1}$	teplota stěny na jedné straně objektu
$T_{w2}$	teplota stěny na druhé straně objektu
$x$	vzdálenost
$\alpha$	procentuální pokles remanentní indukce magnetu na 1 °C
$\alpha_R$	teplotní součinitel odporu
$\alpha_{\vartheta}$	součinitel přestupu tepla
$\beta$	procentuální pokles koerzivní síly magnetu na 1 °C
$\gamma$	měrná hmotnost vody
$\delta$	vzdálenost mezi stěnami
$\Delta\vartheta$	rozdíl teplot

$\lambda$	měrná tepelná vodivost
$\varepsilon$	měrná emisivita povrchu
$\sigma$	Steffan-Boltzmanova konstanta