



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

ASYNCHRONNÍ MOTOR S VNĚJŠÍM ROTOREM

INDUCTION MACHINE WITH OUTER ROTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Štěpán Chvatík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Mach, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

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

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Štěpán Chvatík

ID: 164738

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Asynchronní motor s vnějším rotorem

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Model motoru upravte tak, aby umožňoval provedení optimalizace.
2. Proveďte optimalizaci z hlediska rozměrů stroje.
3. Ověřte teplotu stroje pomocí tepelné sítě.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] KOPYLOV, Igor Petrovič. Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 685 s.
- [2] BOLDEA, I. a NASAR, S. A. The induction machine handbook. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 08-49-0004-5.
- [3] HAUPT, R. L. a HAUPT, S. E. Practical genetic algorithms. Wiley-Interscience, 1998. ISBN 0-471-45565-2.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

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

Konzultant:

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem asynchronního motoru atypické konstrukce, s rotorem umístěným na vnější části stroje, a jeho využitelnost ve vodohospodářském průmyslu, kde hlavním požadavkem je optimalizace jeho konstrukce z hlediska geometrických rozměrů.

V úvodu práce je nejprve stručně vysvětlena problematika asynchronních motorů a jejich použití ve spolupráci s frekvenčními měniči a naznačen postup řešení práce.

V následující kapitole je rozebírán elektromagnetický model výchozího návrhu stroje, jeho geometrické rozměry a možnosti jeho analýzy. Následně je proveden výpočet, nejprve analyticky pomocí programu RMxpert, a poté metodou konečných prvků v programu Ansys Maxwell.

Třetí kapitola je věnována zevrubnému návrhu konstrukce stroje, včetně představení materiálu, ze kterých by měl být vyroben.

Čtvrtá část práce se zabývá návrhem tepelné sítě, jejímž vstupem jsou převážně geometrické dispozice a elektrické ztráty v jednotlivých částech stroje. Na základě vytvořené sítě je vypočteno oteplení jednotlivých částí stroje, přičemž následně je prováděna kontrola, zda nebyla překročena maximální dovolená teplota vinutí.

Předposlední část pojednává o genetickém algoritmu, jeho návrhu, a praktické využitelnosti v rámci optimalizace s požadavkem na minimální rozměry stroje.

Jelikož není známo přesné konstrukční řešení mechanické části čerpadla, je poslední část věnována případové studii, ve které je provedeno srovnávání teoreticky dosažitelných rozměrů stroje v závislosti na kvalitě odvodu tepelných ztrát.

Klíčová slova

Asynchronní motor; vnější rotor; čerpadlo; tepelná síť; výpočet oteplení; genetický algoritmus; optimalizace; elektromagnetický model; metoda konečných prvků; tepelná třída izolace

Abstract

This master's thesis deals with design of induction machine with atypical construction with outer rotor and its usability in the water industry where the main requirement is to optimize its construction in terms of geometrical dimension.

The problem of induction motor is explained in the introduction of thesis, and their use in cooperation with frequency converters is indicated.

In the next chapter analyses the electromagnetic model of initial design of machine, its geometric dimensions and the possibilities of its analysis. Then the analysis of this machine is performed by the analytical method, using the RMxpert computation program, followed by the finite element method which is solved in Ansys Maxwell program.

The third chapter is devoted to detailed design of the machine construction, including the presentation of the material for individual part.

The fourth part of the thesis deals with the design of a thermal network. The input values of this thermal network are predominantly geometric and electric losses in individual parts of the machine. Based on the created thermal network, the warming of the individual parts of the machine is calculated. Due to the results of this procedure, the control is made for checking that the maximum permitted winding temperature has not been exceeded.

The penultimate part deals with the genetic algorithm, its design and practical applicability for optimization with the requirement for minimum machine dimensions.

Since we don't know the exact design of the mechanical parts of the pumps, the last part is devoted to a case study in which is made a comparison of the theoretically achievable dimensions of the machine in relation to the quality of heat losses.

Keywords

Induction machine; outer rotor; water pump; thermal network; thermal analysis; optimization; electromagnetic model; finite element method; thermal insulation class

Bibliografická citace:

CHVATÍK, Š. *Asynchronní motor s vnějším rotorem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 59 s. Vedoucí práce: Ing. Martin Mach, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Asynchronní motor s vnějším rotorem jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce Ing. Martina Macha, Ph.D. 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 jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 20. května 2018

.....
podpis autora

Poděkování

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

V Brně dne 20. května 2018

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	1
2	Elektromagnetický výpočet stroje	2
2.1	Požadované parametry a geometrické rozměry stroje.....	2
2.2	Analytický výpočet v programu RMxpert.....	3
2.3	Simulace metodou konečných prvků v programu Ansys Maxwell.....	7
3	Návrh konstrukce stroje	15
3.1	Návrh konstrukce stroje v programu Autocad Inventor	15
4	Tepelný výpočet stroje	18
4.1	Sdílení tepla uvnitř a vně elektrického stroje	19
4.1.1	Přenos tepla vedením.....	19
4.1.2	Přenos tepla prouděním.....	20
4.2	Výpočet teplot metodou tepelné sítě	22
4.2.1	Navrh tepelné sítě.....	22
4.2.2	Výpočet tepelných vodivostí [4].....	24
4.2.3	Sestavení matic a jejich řešení [4]	31
5	Optimalizace metodou genetického algoritmu z hlediska rozměrů stroje	34
5.1	Sestavení genetického algoritmu.....	34
5.1.1	Definice „ohodnocovací“ funkce.....	35
5.1.2	Definice proměnných a generování počáteční populace	37
5.1.3	Výběr párů ke křížení (selekce)	38
5.1.4	Křížení jedinců	40
5.1.5	Mutace	41
5.1.6	Ukončovací podmínka.....	42
5.2	Shrnutí hlavních znaků a výhod genetického algoritmu	43
6	Případová studie optimálních řešení navrhovaného stroje.....	44
6.1	Studie z hlediska použitých materiálů.....	44
6.2	Studie vlivu natočení rotorových tyčí a použití otevřených/uzavřených drážek referenčního vzorku.....	49
6.3	Parametry výsledného řešení stroje	51
	Závěr.....	53
	Literatura	55
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	57

Seznam obrázků

Obr. 1.1 Čerpání vody při použití asynchronního motoru a) existující aplikace s vnitřním rotorem [10] b) navrhovaná aplikace s vnějším rotorem.....	1
Obr. 2.1 Výchozí geometrie stroje.....	3
Obr. 2.2 Prostředí programu Ansys RMxpert.....	4
Obr. 2.3 Nastavení rozměrů statorové drážky.....	4
Obr. 2.4 Závislost vstupního proudu na otáčkách stroje (RMxpert)	5
Obr. 2.5 Závislost momentu na otáčkách stroje (RMxpert)	5
Obr. 2.6 Závislost účinníku na otáčkách stroje (RMxpert).....	6
Obr. 2.7 Závislost účinnosti na otáčkách stroje (RMxpert).....	6
Obr. 2.8 Prostředí programu Ansys Maxwell	8
Obr. 2.9 Výpočtová síť modelu.....	8
Obr. 2.10 Fázové proudy stroje v závislosti na čase (Maxwell)	9
Obr. 2.11 Moment stroje v závislosti na čase (Maxwell)	9
Obr. 2.12 Jouleovy ztráty ve vinutí statoru v závislosti na čase (Maxwell)	10
Obr. 2.13 Jouleovy v rotorových tyčích v závislosti na čase (Maxwell)	10
Obr. 2.14 Ztráty v železe statoru a rotoru v závislosti na čase (Maxwell)	12
Obr. 2.15 Rozložení magnetické indukce v řezu výchozího návrhu stroje	14
Obr. 3.1 Sestava stroje s vysunutými součástmi	15
Obr. 3.2 Sestava stroje a jeho uchycení v trubce o průměru 200 mm, boční řez	15
Obr. 3.3 Sestava stroje a jeho uchycení v trubce o průměru 200 mm, čelní řez.....	16
Obr. 4.1 Závislost teploty statorového vinutí na životnosti izolace [1].....	18
Obr. 4.2 Přenos tepla vedením jednoduchou rovinnou stěnou, upraveno z [5]	19
Obr. 4.3 Tepelné schéma asynchronního stroje s vnějším rotorem, sestaveno dle [4]	23
Obr. 5.1 Diagram a) binárního genetického algoritmu, b) spojitého genetického algoritmu, sestaveno dle [13]	35
Obr. 5.2 Zjednodušené schéma optimalizačního procesu v rámci konkrétní situace	36
Obr. 5.3 Pravděpodobnost výběru v rámci ruletové selekce a) podle hodnoty b) podle pořadí	39
Obr. 6.1 Rozložení magnetické indukce v řezu stroje s nejhorším odvodem tepla (vzorek 1)	45
Obr. 6.2 Rozložení magnetické indukce v řezu stroje s lepším odvodem tepla (vzorek 2).....	45
Obr. 6.3 Rozložení magnetické indukce v řezu stroje s nejlepším odvodem tepla (vzorek 3)	46
Obr. 6.4 Poměrný objem stroje jednotlivých vzorků vztažený k výchozímu návrhu	48

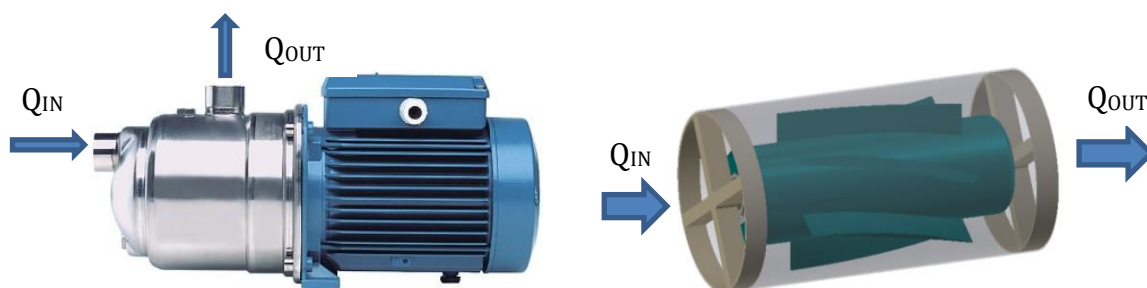
Obr. 6.5 Časový průběh momentu v ustáleném stavu při použití otevřené a uzavřené rotorové drážky s nenatočenými tyčemi	49
Obr. 6.6 Časový průběh momentu v ustáleném stavu při použití otevřených rotorových drážek s natočenými a nenatočenými tyčemi	50
Obr. 6.7 Časový průběh momentu v ustáleném stavu při použití otevřených drážek s nenatočenými tyčemi a uzavřených rotorových drážek s natočenými tyčemi	50
Obr. 6.8 Geometrie výsledného řešení stroje	52

Seznam tabulek

Tab. 2.1 Parametry výchozího návrhu stroje	2
Tab. 2.2 Hodnoty odečtené z grafických závislostí při jmenovitých otáčkách (RMxpvt)	6
Tab. 2.3 Hodnoty ztrát získané ze záznamu „Solution Data“ (RMxpvt)	7
Tab. 2.4 Hodnoty odečtené z grafických závislostí pro ustálený stav (Maxwell).....	12
Tab. 2.5 Hodnoty ztrát odečtené z grafických závislostí pro ustálený stav (Maxwell)	12
Tab. 2.6 Porovnání parametrů stroje zjištěných pomocí RMxpvt a MKP v programu Maxwell	13
Tab. 2.7 Hodnoty magnetické indukce v jednotlivých částech stroje	14
Tab. 3.1 Navržené rozměry stroje využitelné pro výpočet tepelné sítě	17
Tab. 4.1 Tepelné třídy izolace [1].....	18
Tab. 4.2 Hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ použitých materiálů [2]	21
Tab. 4.3 Hodnoty součinitele přestupu tepla α z částí stroje [4]	21
Tab. 4.4 Popis jednotlivých uzlů tepelného schématu.....	23
Tab. 4.5 Vypočtené hodnoty teplot jednotlivých částí stroje při okolní teplotě vody $\vartheta_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	33
Tab. 5.1 Vypočtené hodnoty.....	37
Tab. 6.1 Hodnoty magnetické indukce jednotlivých vzorků	46
Tab. 6.2 Srovnávací tabulka parametrů jednotlivých vzorků	47
Tab. 6.3 Srovnání elektrických parametrů v rámci jednotlivých modifikací	51
Tab. 6.4 Parametry výsledného řešení stroje.....	52

1 ÚVOD

Asynchronní stroje patří v současnosti stále mezi nejčastěji využívané stroje, které naleznou uplatnění v široké škále elektrických pohonů, zejména pak v průmyslových aplikacích. Jejich největší předností je jednoduchost, spolehlivost a nízká cena v porovnání s jinými druhy točivých elektrických strojů. V nedávné minulosti se také podařilo odstranit hlavní nedostatek asynchronního motoru, kterým byla nemožnost efektivně řídit otáčky. Toto omezení bylo eliminováno použitím frekvenčních měničů, které zajišťují možnost plynulé změny rychlosti otáčení stroje. Asynchronní motory s frekvenčními měniči naleznou uplatnění v pohonech čerpadel, kompresorů, ventilátorů, robotů, hybridních nebo elektrických vozidel, a jiných. [1]



Obr. 1.1 Čerpání vody při použití asynchronního motoru a) existující aplikace s vnitřním rotorem [10] b) navrhovaná aplikace s vnějším rotorem

Cílem této diplomové práce je návrh atypické konstrukce asynchronního motoru s vnějším rotorem pro aplikaci ve vodním hospodářství. Úkolem práce je ověřit výchozí návrh stroje z hlediska parametrů a dovolených oteplení a upravit jej tak, aby umožňoval provedení optimalizace z hlediska konstrukce. Účelem této optimalizace je, aby bylo dosaženo co nejmenších rozměrů, při zachování požadovaných parametrů a dovolených oteplení jednotlivých částí stroje.

Výchozím bodem pro vypracování práce je tedy existující návrh geometrie elektromagnetické části stroje. Tento návrh je nutno nejprve ověřit, z hlediska požadovaných parametrů, programem ANSYS RMxprt. Tyto parametry budou následně ověřeny v programu ANSYS Maxwell metodou konečných prvků. Pro další postup je dále nezbytné vyčíslit jednotlivé ztráty ve stroji. Zjištěné ztráty, společně s geometrickými rozměry stroje, budou následně využity k sestavení tepelné sítě, s jejíž pomocí pak bude možné vyčíslit oteplení v jednotlivých částech stroje, a posoudit tak proveditelnost navrhovaného řešení z hlediska maximálních dovolených oteplení stroje. Poté již bude možno přikročit k samotné optimalizaci na co nejmenší rozměry, k čemuž bude využit genetický algoritmus.

2 ELEKTROMAGNETICKÝ VÝPOČET STROJE

Elektromagnetický výpočet stroje bude proveden v programu ANSYS. Nejprve bude provedena analýza pomocí nadstavbového programu RMXprt, který se vyznačuje nízkou časovou náročností výpočtu a snadnou obsluhou. Výsledky této analýzy budou následně ověřeny simulací metodou konečných prvků (dále jen zkráceně MKP) v programu Maxwell, který dosahuje přesnějších výsledků, avšak za cenu vyšší časové náročnosti výpočtu.

Cílem tohoto výpočtu je ověřit model stroje z hlediska elektrických parametrů a stanovit výkonové ztráty, které představují vstupní veličiny pro návrh tepelné sítě.

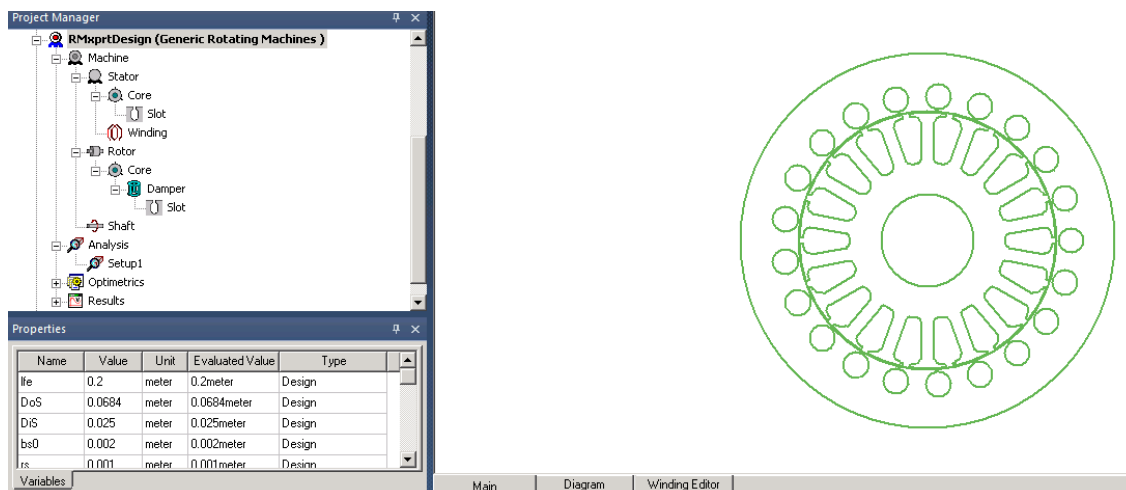
2.1 Požadované parametry a geometrické rozměry stroje

Požadované parametry stroje jsou jmenovité otáčky 5000 min^{-1} a výkon 2000 W . Požadovaný jmenovitý moment stroje vypočítáme dle empirického vztahu:

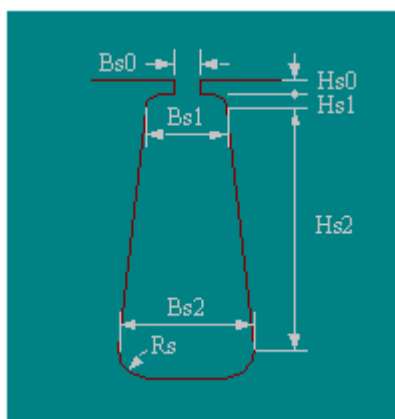
$$M_{n_{\text{pož}}} = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{P_n}{2\pi \cdot \frac{n_n}{60}} = \frac{2000}{2\pi \cdot \frac{5000}{60}} = 3,82 \text{ Nm} \quad (2.1)$$

Tab. 2.1 Parametry výchozího návrhu stroje

Veličina	Hodnota	Jednotka	Popis
2p	2	[-]	Počet pólů stroje
D _{oR}	100	[mm]	Vnější průměr rotoru
D _{iR}	69	[mm]	Vnitřní průměr rotoru
Q _R	25	[-]	Počet tyčí rotorové klece
d _t	7	[mm]	Průměr tyče rotorové klece
h _{r0}	0,4	[mm]	Výška otevření rotorové drážky
b _{r0}	0,3	[mm]	Šířka otevření rotorové drážky
a _k	11,2	[mm]	Výška kruhů rotoru
b _k	13,7	[mm]	Šířka kruhů rotoru
D _{oS}	68,4	[mm]	Vnější průměr statoru
D _{iS}	25	[mm]	Vnitřní průměr statoru
Q _S	18	[-]	Počet statorových drážek
h _{s0}	1	[mm]	Výška otevření statorové drážky
h _{s1}	2	[mm]	Výška statorové drážky 1
h _{s2}	8,5	[mm]	Výška statorové drážky 2
r _s	1	[mm]	Poloměr zaoblení dna statorové drážky
b _{s0}	2	[mm]	Šířka otevření statorové drážky
b _{zs}	3,5	[mm]	Šířka zubu statoru
l _{Fe}	200	[mm]	Délka statorového a rotorového svazku
k _{Fe}	0,94	[-]	Činitel plnění železa
d _{Cu}	0,8	[mm]	Průměr vodiče statorového vinutí
N _{zav}	42	[-]	Počet závitů



Obr. 2.2 Prostředí programu Ansys RMxprt



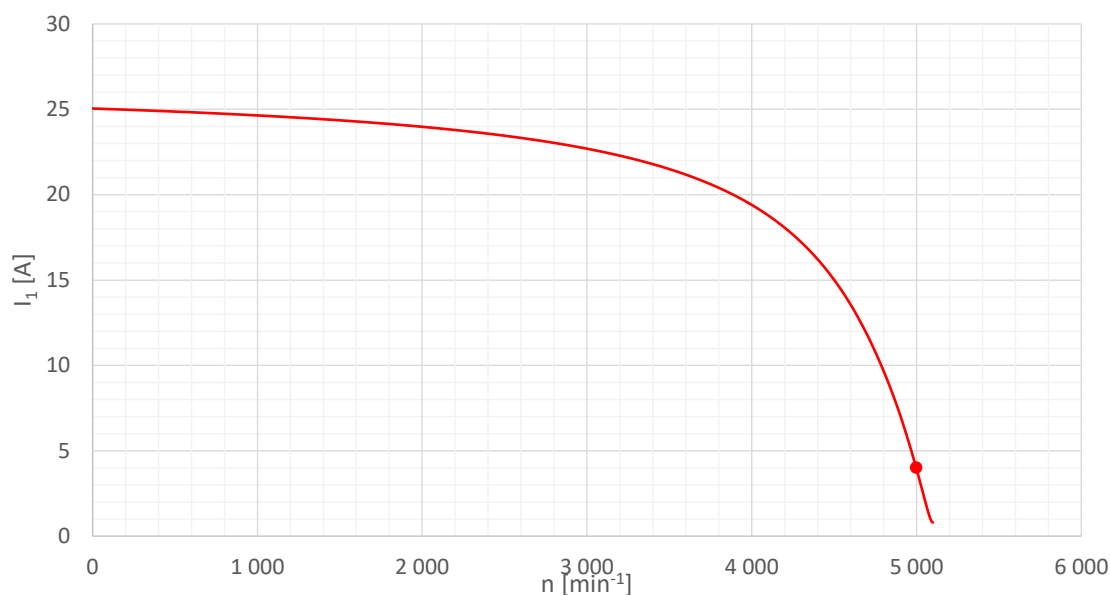
Obr. 2.3 Nastavení rozměrů statorové drážky

Ještě před samotným nastavením analýzy bylo nutné vybrat typ řešeného stroje. Jelikož program RMxprt neumožňuje nastavení vnějšího rotoru pro typ „Three-Phase Induction Motor“, který je přímo určen pro výpočet trojfázových asynchronních motorů, bylo nutné nastavit typ stroje na „Generic Rotating Machines“. Poté bylo provedeno nastavení materiálů a jejich vlastností. Pro vinutí a rotorové tyče byla nastavena měď. Její výchozí elektrická vodivost byla přepočítána tak, aby odpovídala vodivosti mědi při 75°C. Pro magnetický obvod statoru i rotoru byly použity plechy M330-35A, jejichž parametry byly nastaveny dle katalogového listu [9].

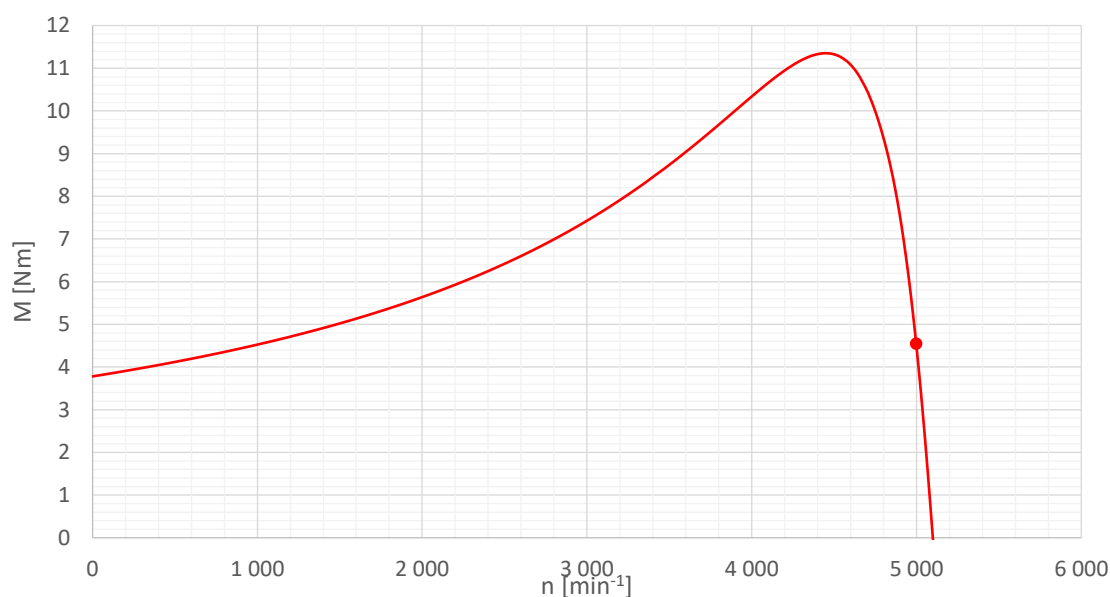
Poslední nezbytná úprava spočívala v parametrizaci jednotlivých rozměrů a dalších vlastností stroje (počet drážek, počet vodičů). Tato úprava umožní nastavovat parametry modelu z vnějšího programu, kterým bude v rámci této práce program Matlab, ve kterém je naprogramován optimalizační genetický algoritmus, o jehož sestavení je pojednáno v kapitole 5.

Poté byly zadány výchozí parametry stroje a provedeno nastavení analýzy, což spočívalo v zadání jmenovitých otáček, požadovaného výkonu, napájecího napětí a provozní teploty stroje (v našem případě byla nastavena teplota 75° C).

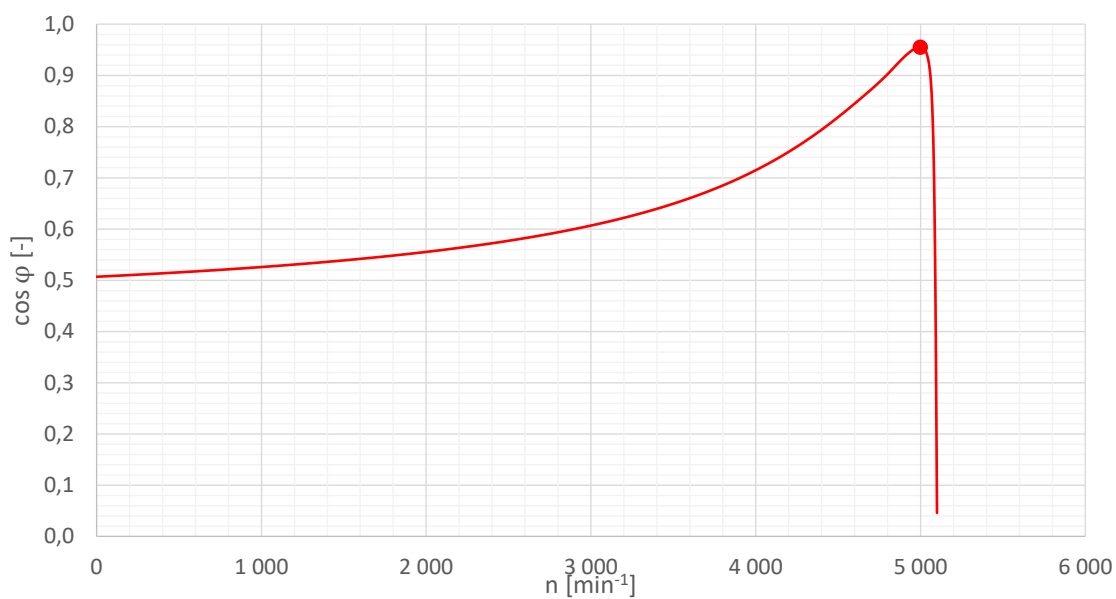
Výsledky analytických výpočtů reprezentují grafické závislosti na Obr. 2.3-2.6, jejichž jmenovité body jsou pro přehlednost uvedeny v Tab. 2.2. Ztráty získané ze záznamu „Solution Data“ jsou pak uvedeny v Tab. 2.3. Tyto ztráty budou následně použity pro výpočet tepelné sítě v rámci genetického algoritmu.



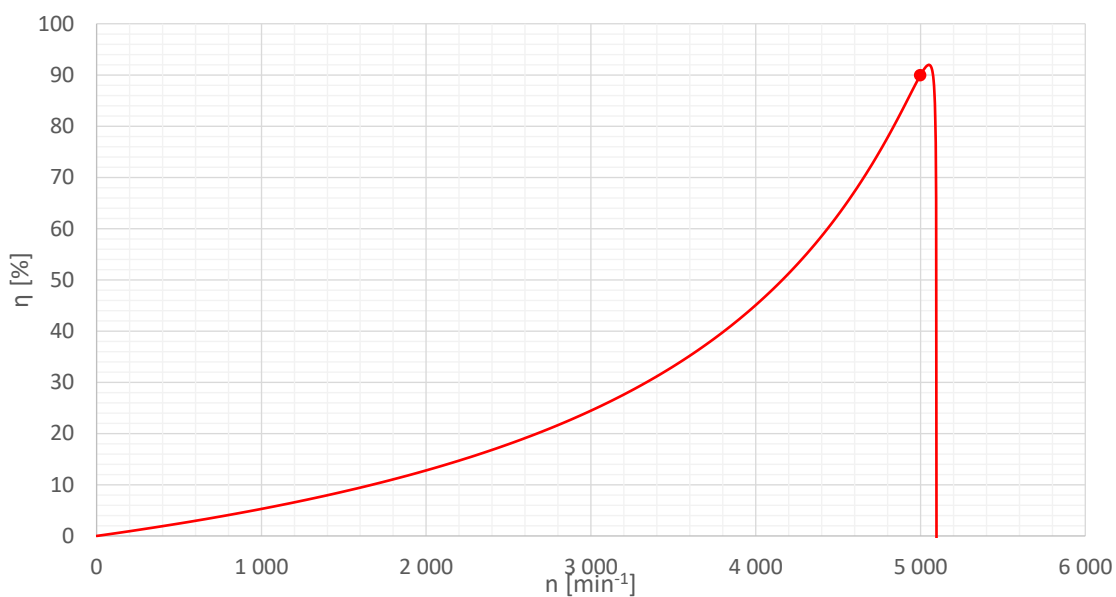
Obr. 2.4 Závislost vstupního proudu na otáčkách stroje (RMxpřt)



Obr. 2.5 Závislost momentu na otáčkách stroje (RMxpřt)



Obr. 2.6 Závislost účinníku na otáčkách stroje (RMxpřt)



Obr. 2.7 Závislost účinnosti na otáčkách stroje (RMxpřt)

Tab. 2.2 Hodnoty odečtené z grafických závislostí při jmenovitých otáčkách (RMxpřt)

Veličina	Hodnota	Jednotka	Popis
I_{1n}	3,928	[A]	Jmenovitý vstupní efektivní proud stroje
M_n	4,47	[Nm]	Jmenovitý moment stroje
$\cos \varphi_n$	0,9547	[-]	Jmenovitý účinník stroje
η_n	90,00	[%]	Jmenovitá účinnost stroje

Tab. 2.3 Hodnoty ztrát získané ze záznamu „Solution Data“ (RMxprrt)

Veličina	Hodnota	Jednotka	Popis
ΔP_{j1}	142,9	[W]	Joulové ztráty ve vinutí statoru
ΔP_{j2}	40,5	[W]	Joulové ztráty v rotorové kleci
ΔP_{Fe1}	15,3	[W]	Ztráty v zubech statoru
ΔP_{Fe2}	1,0	[W]	Ztráty v zubech rotoru
ΔP_{Fe}	16,3	[W]	Celková ztráty v železe

Zjištěný jmenovitý moment stroje přepočteme na jmenovitý výkon dle vztahu:

$$P_2 = M_n \cdot \omega_n = M_n \cdot 2\pi \cdot \frac{n_n}{60} = 4,47 \cdot 2\pi \cdot \frac{5000}{60} = 2340,5 \text{ W} \quad (2.1)$$

Je zřejmé, že hodnota zjištěného jmenovitého výkonu stroje značně převyšuje hodnotu požadovanou, předběžně lze tedy odhadnout, že z hlediska požadovaných elektro-mechanických parametrů je stroj navržen správně. Motor je účelně navržen na vyšší výkon z důvodu neznalosti mechanických ztrát, které jsou závislé na způsobu konstrukčního řešení čerpadla. V následující podkapitole budou výsledné hodnoty ověřeny programem Ansys Maxwell.

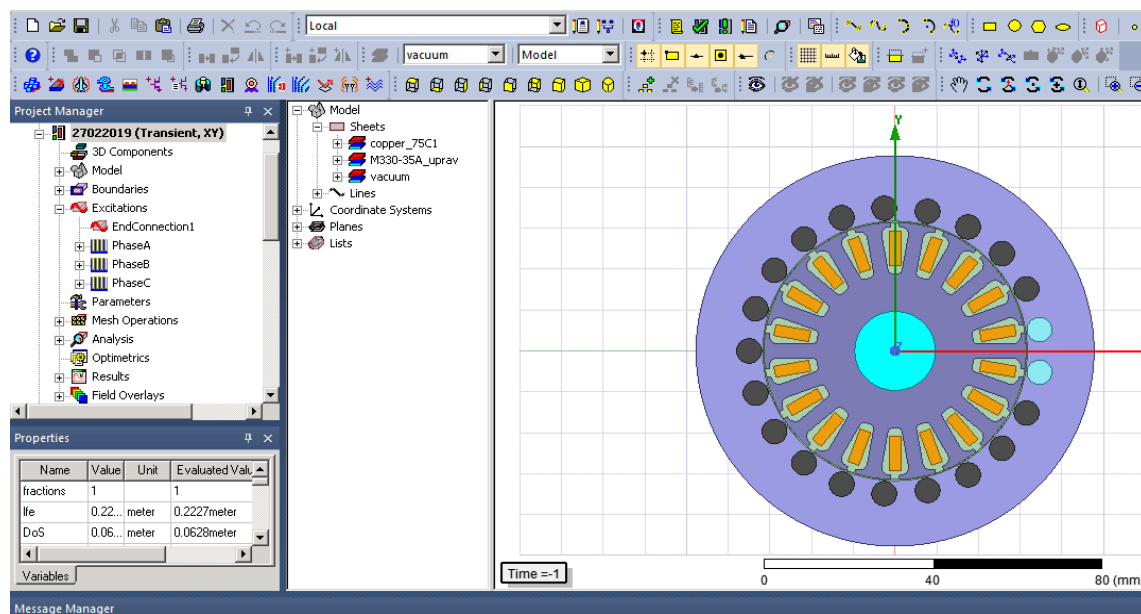
2.3 Simulace metodou konečných prvků v programu Ansys Maxwell

Jak již bylo zmíněno, prostředí programu Ansys umožňuje automatický převod RMxprrt modelu do Maxwell 2D analýzy a to včetně vstupních parametrů a okrajových podmínek pro výpočet. Převod však nemusí být vždy zcela korektní, proto je důležité jej vždy ověřit, případně některá nastavení provést ručně.

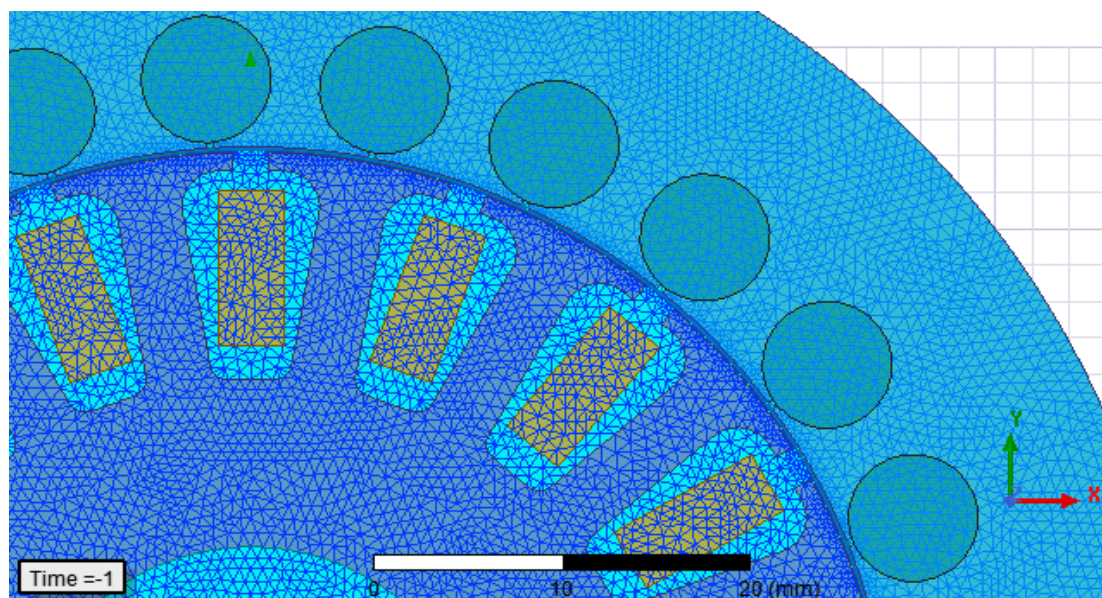
Důležitá byla zejména korekce vlastností použitých materiálů. Nejprve bylo nutné upravit B-H křivky použitých dynamo plechů M330-35A dle katalogového listu převzatého z [9]. Dále byl proveden přepočet vodivosti mědi pro teplotu 75 °C, a nastaven odpor části zkratovacích kruhů tak aby této vodivosti odpovídal. Jelikož je pro testovací verzi stroje uvažována hřídel z plastu, byl pro ni v rámci modelu přiřazen jako materiál vzduch (přesněji vakuum), tato úprava byla provedena z důvodu, aby hřídel nemohla eventuálně ovlivnit průběh magnetických siločar. Další úpravy spočívaly ve zohlednění vlivu vířivých ztrát v pevných částech stroje (rotorové tyče) a nastavení výpočtu ztrát v železe pro magnetický obvod statoru a rotoru.

Jelikož program Maxwell hlásil chybovou hlášku při nastavení rotace vnějšího rotoru, byla za otočnou část stroje („Band“) zvolena geometrie statoru. Nakonec bylo provedeno zhuštění automaticky vytvořené sítě, a to zejména v oblasti vzduchové mezery, čímž byla zajištěna dostatečná přesnost výpočtu (viz. Obr. 2.8).

Po všech nezbytných úpravách modelu byl nastaven čas kroku simulace na $5e-5$ s a délka simulace na 0,1 s, což je čas, který by měl být dostatečný pro ustálení přechodných jevů. Poté již byla provedena samotná simulace.



Obr. 2.8 Prostředí programu Ansys Maxwell

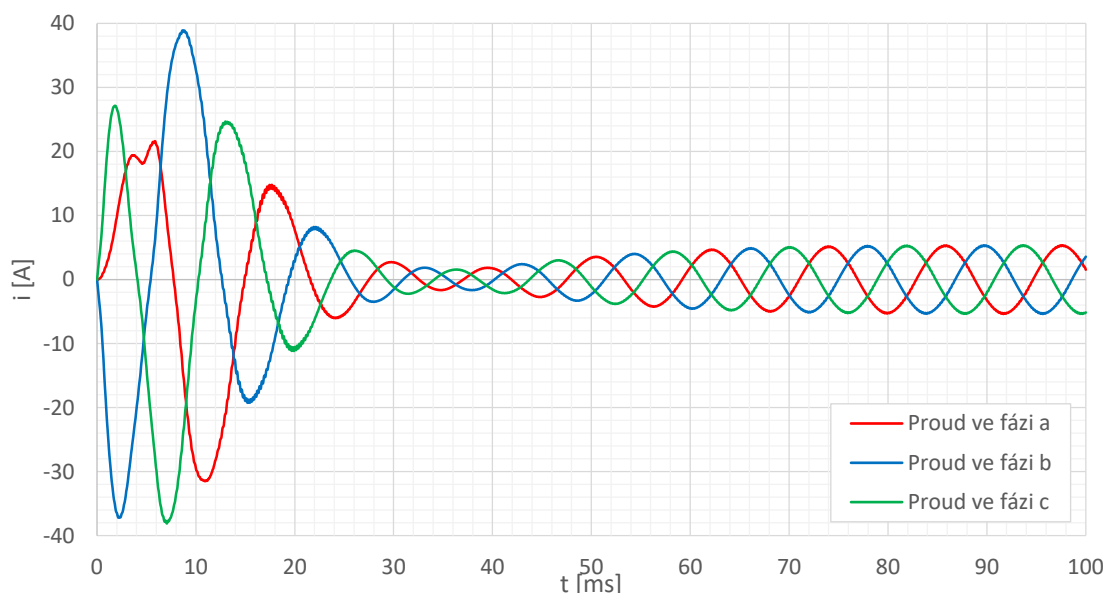


Obr. 2.9 Výpočtová síť modelu

Na Obr. 2.9 jsou zobrazeny časové průběhy fázových proudů stroje. Za využití programové funkce byly zjištěny efektivní hodnoty těchto proudů v časovém okamžiku, který byl považován za ustálený stav, konkrétně v čase od 80 do 100 ms.

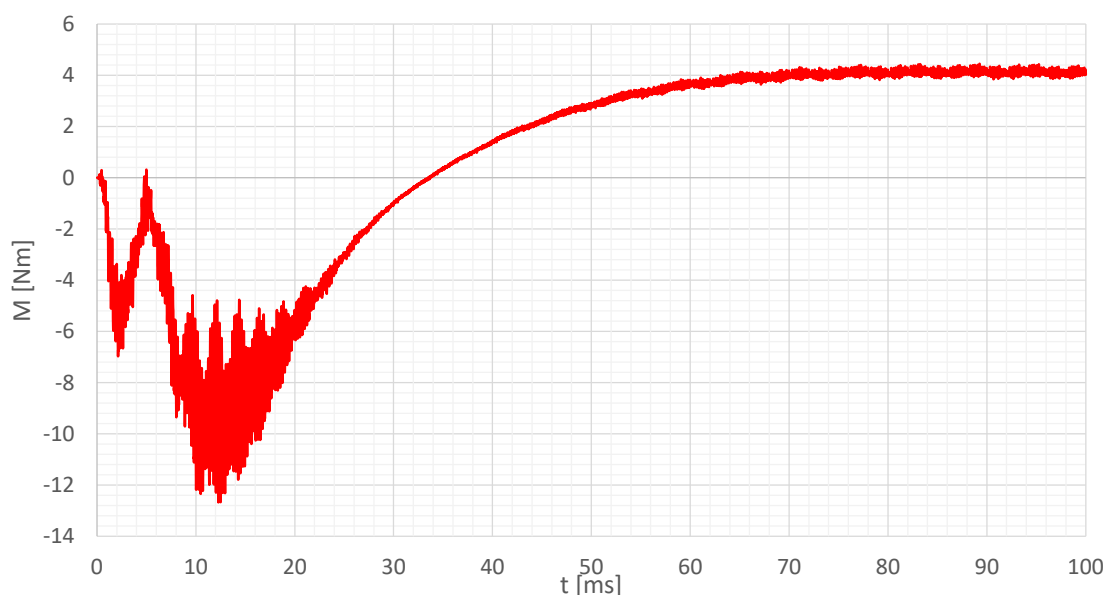
Jmenovitá hodnota efektivního proudu byla zjištěna aritmetickým průměrem efektivních hodnot proudů v jednotlivých fázích stroje:

$$I_{1ef,prum} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} = \frac{3,7646 + 3,5649 + 3,8394}{3} = 3,723 \text{ A} \quad (2.2)$$



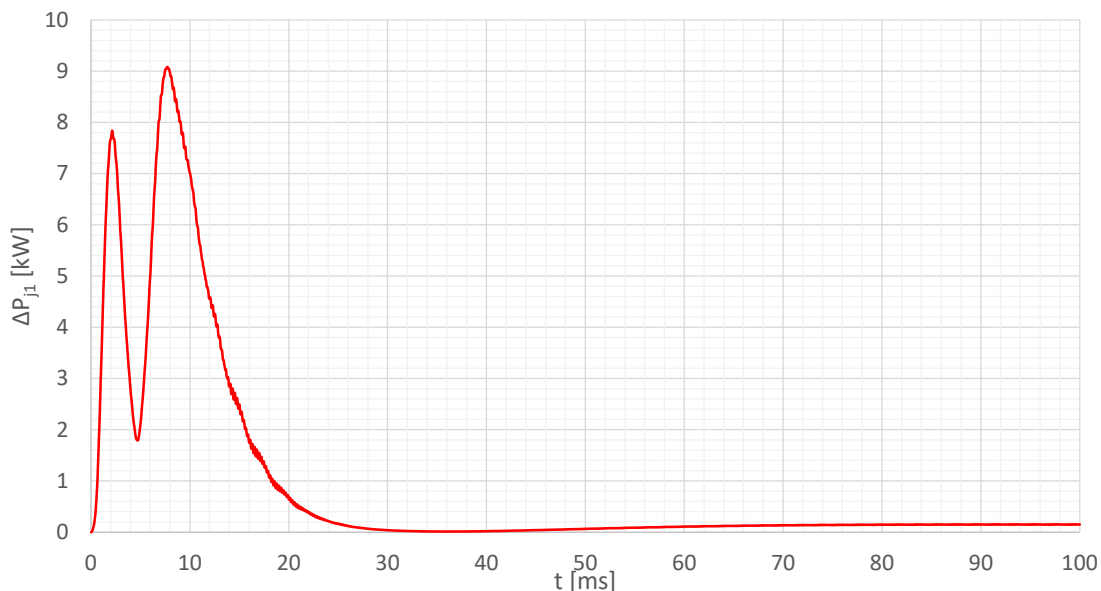
Obr. 2.10 Fázové proudy stroje v závislosti na čase (Maxwell)

Na Obr. 2.10 je vidět časová závislost momentu stroje, ze které byla odečtena hodnota momentu stroje v ustáleném stavu, tj. 4,1113 Nm, která odpovídá jeho jmenovité hodnotě. Rozkmit časového průběhu momentu je zřejmě způsoben otevřením rotorových drážek a jejich nenatočením.

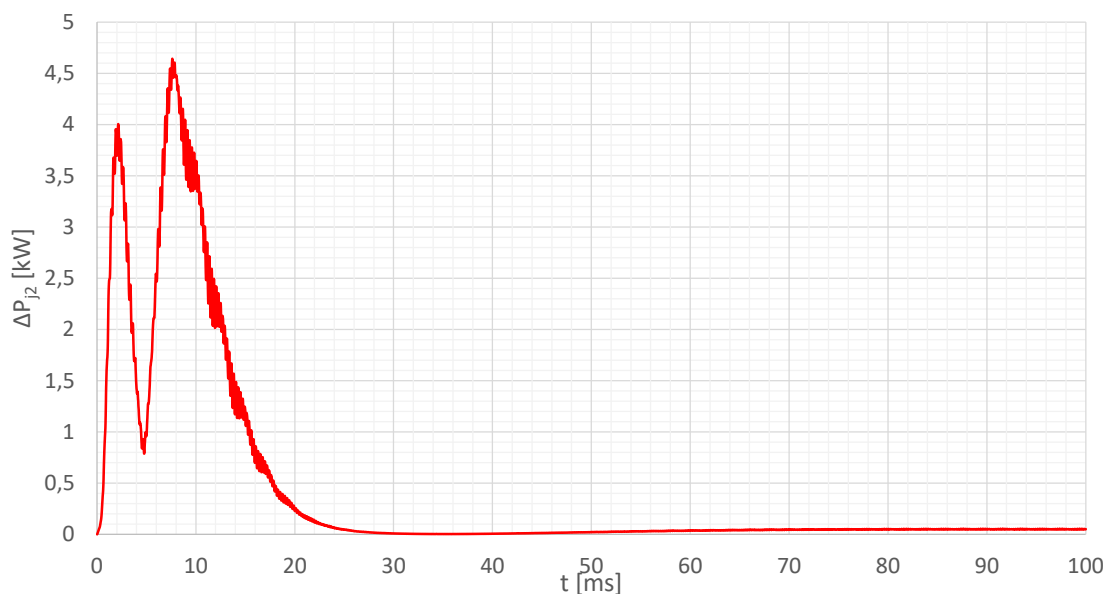


Obr. 2.11 Moment stroje v závislosti na čase (Maxwell)

Z grafických závislostí na Obr. 2.11-2.13 byly zjištěny hodnoty ztrát stroje v ustáleném stavu. Velikosti těchto ztrát jsou uvedeny v Tab. 2.5 a budou využity jako vstupní hodnoty v rámci kontrolního výpočtu tepelné sítě.



Obr. 2.12 Jouleovy ztráty ve vinutí statoru v závislosti na čase (Maxwell)



Obr. 2.13 Jouleovy v rotorových tyčích v závislosti na čase (Maxwell)

Jelikož použitá 2D analýza neumožňuje výpočet ztrát ve zkratovacích kruzích, je nezbytné tyto ztráty spočítat dodatečně ze ztrát v rotorových tyčích, které nabývají velikosti $\Delta P_t = 49,8 \text{ W}$ v ustáleném stavu. Součtem obou těchto ztrát pak získáme hodnotu celkových Jouleových ztrát v rotorové kleci.

Pro určení ztrát v rotorových tyčích bylo nejprve nutné vypočítat jejich odpor a proud který jimi protéká. Následující vztahy, s výjimkou (2.3) a (2.10) byly převzaty z [8]. Odpor rotorového kruhu lze získat vynásobením odporu jeho části mezi dvěma tyčemi a celkového počtu rotorových tyčí:

$$R_k = R_{k1} \cdot Q_R = 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot 25 = 42,5 \mu\Omega \quad (2.3)$$

Odpor rotorové tyče je dán vztahem:

$$R_t = \rho_{Cu_{75^\circ C}} \cdot \frac{l_t}{s_t} = 2,105 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,2}{38,5 \cdot 10^{-6}} = 109 \mu\Omega \quad (2.4)$$

kde $\rho_{Cu_{75^\circ C}}$ je měrný odpor mědi při 75 °C, l_t délka rotorové tyče, s_t průřez tyče.

Efektivní hodnotu proudu v rotorových tyčích je možné určit z vzorce pro výpočet Jouleových ztrát rotoru:

$$I_{t_{ef}} = \sqrt{\frac{\Delta P_t}{Q_R \cdot R_t}} = \sqrt{\frac{49,8}{25 \cdot 109 \cdot 10^{-6}}} = 135,2 \text{ A} \quad (2.5)$$

Střední hodnotě tohoto proudu pak odpovídá vztah:

$$I_{t_{stř}} = \frac{2}{\pi} \cdot I_{t_{ef}} = \frac{2}{\pi} \cdot 135,2 = 86,1 \text{ A} \quad (2.6)$$

Amplituda proudu v kruhu se vypočítá dle vztahu:

$$I_{k_{max}} = \frac{Q_R}{4p} \cdot I_{t_{stř}} = \frac{25}{4} \cdot 86,1 = 538,1 \text{ A} \quad (2.7)$$

Efektivní hodnota tohoto proudu je pak:

$$I_{k_{ef}} = \frac{I_{k_{max}}}{\sqrt{2}} = \frac{538,1}{\sqrt{2}} = 380,5 \text{ A} \quad (2.8)$$

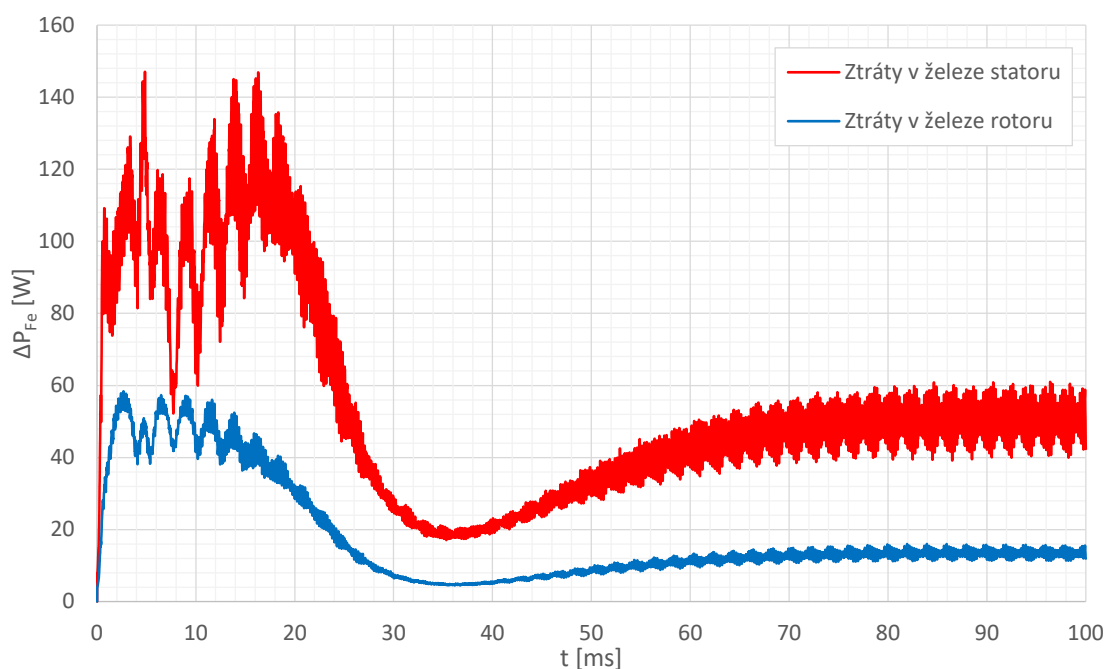
Ted' už jsou známy všechny hodnoty potřebné pro výpočet ztrát v rotorových kruzích:

$$\Delta P_k = R_k \cdot I_{k_{ef}}^2 \cdot n = 42,5 \cdot 10^{-6} \cdot 380,5^2 \cdot 2 = 12,3 \text{ W} \quad (2.9)$$

kde $n = 2$ je konstanta udávající umístění kruhů na obou koncích rotorových tyčí.

Celkové ztráty rotorové klece pak jsou dány součtem:

$$\Delta P_{j2} = \Delta P_k + \Delta P_t = 12,3 + 49,8 = 62,1 \text{ W} \quad (2.10)$$



Obr. 2.14 Ztráty v železe statoru a rotoru v závislosti na čase (Maxwell)

Tab. 2.4 Hodnoty odečtené z grafických závislostí pro ustálený stav (Maxwell)

Veličina	Hodnota	Jednotka	Popis
I_1	3,723	[A]	Jmenovitý vstupní efektivní proud stroje
M_n	4,11	[Nm]	Jmenovitý moment stroje
$\cos \varphi$	0,9452	[-]	Jmenovitý účinník stroje
η_n	88,65	[%]	Jmenovitá účinnost stroje

Tab. 2.5 Hodnoty ztrát odečtené z grafických závislostí pro ustálený stav (Maxwell)

Veličina	Hodnota	Jednotka	Popis
ΔP_{j1}	149,6	[W]	Jouleovy ztráty ve vinutí statoru
ΔP_{j2}	62,1	[W]	Jouleovy ztráty v rotorové kleci
ΔP_{Fe1}	50,3	[W]	Ztráty v železe statoru
ΔP_{Fe2}	13,5	[W]	Ztráty v železe rotoru
ΔP_{Fe}	63,7	[W]	Celkové ztráty v železe

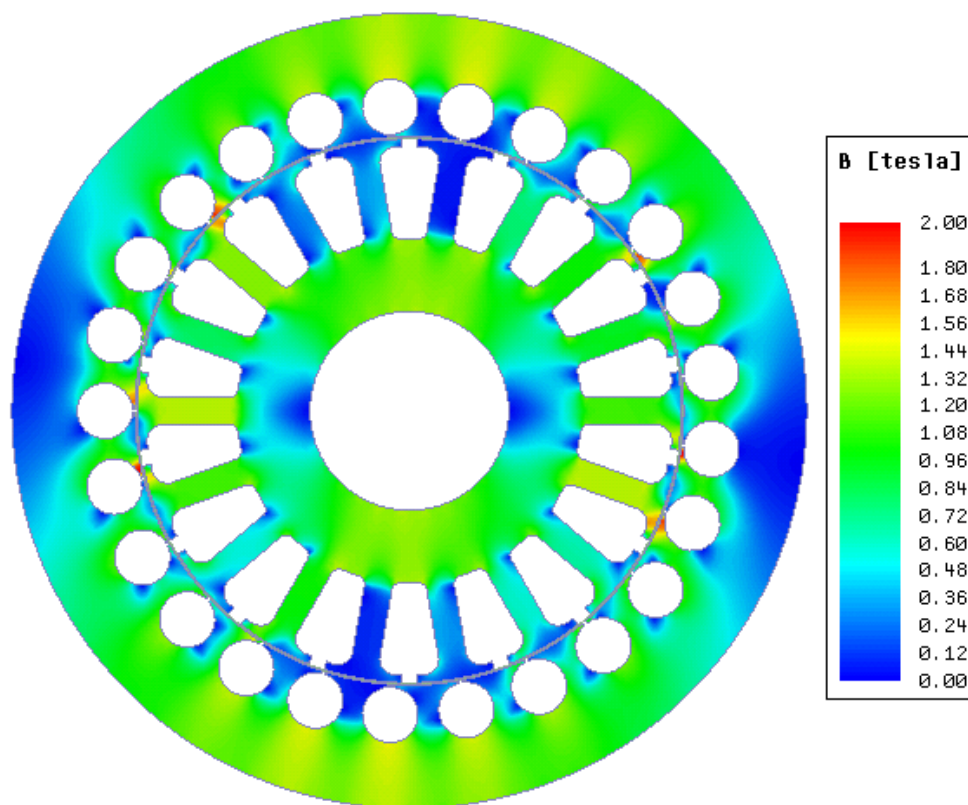
Z výsledků simulace, uvedených v Tab. 2.4 je zřejmé, že simulace provedená pomocí programu Ansys Maxwell potvrzuje skutečnost, že stroj je navržen správně z hlediska požadovaných parametrů. Zda je stroj navržen správně i z hlediska tepelného namáhání bude ověřeno v kapitole 4.

Pro přehlednost byla vytvořena srovnávací tabulka (Tab. 2.6), která obsahuje hodnoty zjištěné z obou simulací.

Tab. 2.6 Porovnání parametrů stroje zjištěných pomocí RMPxrt a MKP v programu Maxwell

	I_1	M_n	$\cos \varphi_n$	η_n	ΔP_{j1}	ΔP_{j2}	ΔP_{Fe1}	ΔP_{Fe2}
	[A]	[Nm]	[-]	[%]	[W]	[W]	[W]	[W]
RMxprt	3,928	4,47	0,9547	90,00	142,9	40,5	15,3	1,0
Maxwell	3,723	4,11	0,9452	88,65	149,6	62,1	50,3	13,5

Ze srovnávací tabulky je zřejmý rozdíl hodnot zjištěných pomocí analytického výpočtu v programu RMxprt a pomocí simulace metodou konečných prvků v programu Maxwell. Tento rozdíl je zřejmě způsoben chybným výpočtem programu RMxprt, což může mít souvislost s již zmiňovanou nutností nastavení typu stroje na „Generic Rotating Machines“. Pokud by byl procentualní rozdíl těchto hodnot alespoň přibližně konstantní, přicházelo by v úvahu jej korigovat zavedením opravných koeficientů, aplikovatelných na vstupní hodnoty genetického algoritmu. Po provedení většího množství simulací a jejich zhodnocení však bylo zjištěno, že velikost těchto rozdílů se mění nelineárně v závislosti na nastavených parametrech stroje, použití opravných koeficientů tak nepřichází v úvahu. Se zmenšováním objemových rozměrů stroje, které souvisejí s hledáním optimálního řešení, pak byly pozorovány největší rozdíly u Jouleových ztrát ve statorovém vinutí, což představuje závažný problém, jelikož tyto ztráty mají největší podíl na celkové teplotě vinutí v ustáleném stavu. Na základě této skutečnosti je tedy nevyhnutelné provádět korekci nalezeného optimálního řešení stroje (dle GA), tak, aby byla splněna jak podmínka maximální dovolené teploty statorového vinutí, tak i minimálního výkonu stroje.



Obr. 2.15 Rozložení magnetické indukce v řezu výchozího návrhu stroje

Hodnoty magnetické indukce v jednotlivých částech stroje, odečtené z Obr. 2.15 jsou uvedeny v Tab. 2.7, kde B_{zs} je magnetická indukce v zubu statoru, B_{zr} v zubu rotoru, B_{js} ve statorovém jhu a B_{jr} ve jhu rotoru.

Tab. 2.7 Hodnoty magnetické indukce v jednotlivých částech stroje

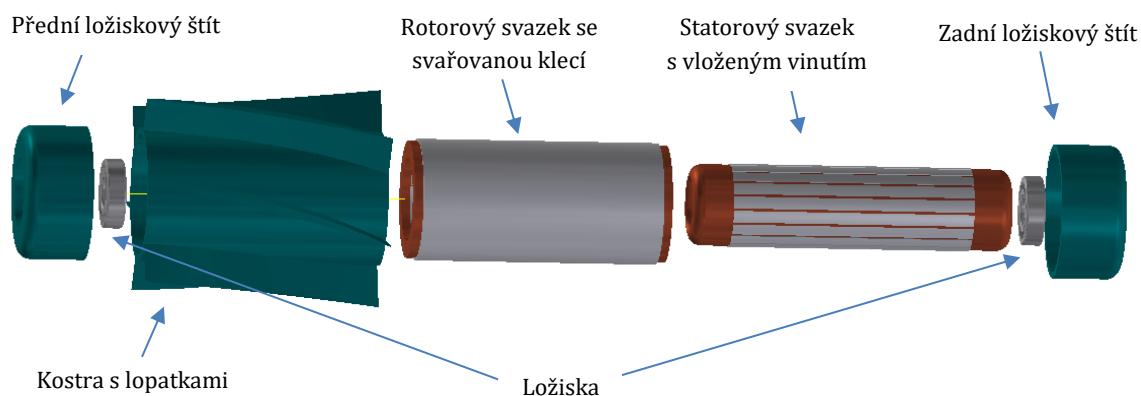
B_{zs}	B_{zr}	B_{js}	B_{jr}
[T]	[T]	[T]	[T]
1,37	1,05	1,32	1,44

3 NÁVRH KONSTRUKCE STROJE

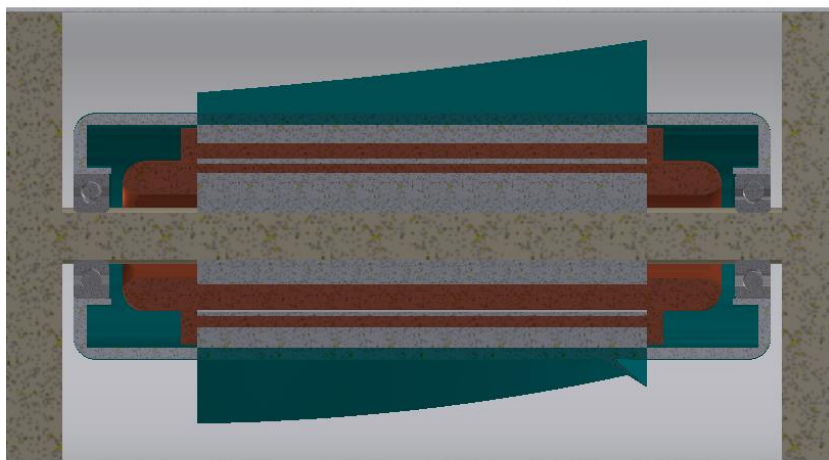
Tato část práce se zabývá předběžným návrhem konstrukce čerpadla. Tento návrh je nezbytným podkladem pro relevantní návržení tepelné sítě, jelikož rozměry jednotlivých součástí, jejich vzájemná poloha ve stroji a materiálové vlastnosti patří mezi vstupní parametry výpočtu tepelných vodivostí, které jsou v této síti obsaženy.

3.1 Návrh konstrukce stroje v programu Autocad Inventor

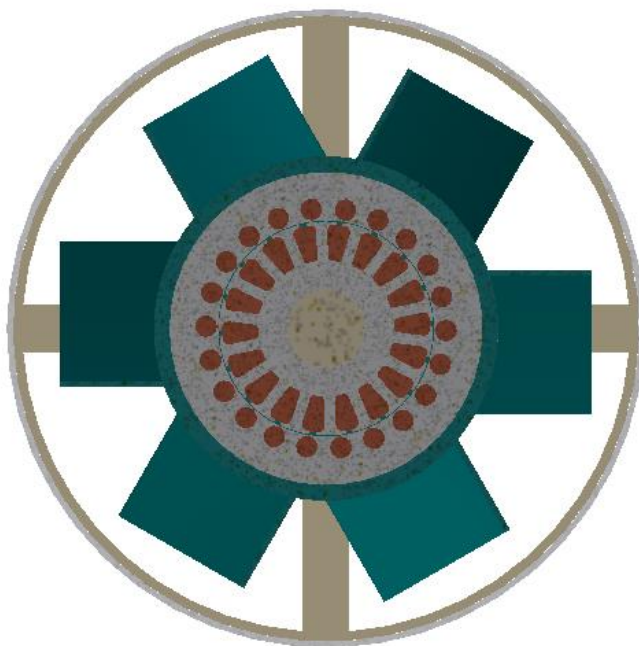
Pro návrh konstrukce byl zvolen program Autocad Inventor, který umožňuje tvorbu součástí a sestav ve 3D. Předlohou pro tento model je výchozí geometrie statorového a rotorového plechu z předchozí kapitoly, dle které byly oba svazky namodelovány. Kompletní sestava možné podoby čerpadla, z různých pohledů, je vidět na Obr. 3.1 - 3.3.



Obr. 3.1 Sestava stroje s vysunutými součástmi



Obr. 3.2 Sestava stroje a jeho uchycení v trubce o průměru 200 mm, boční řez



Obr. 3.3 Sestava stroje a jeho uchycení v trubce o průměru 200 mm, čelní řez

Je nutno zdůraznit, že se jedná pouze o hrubý návrh stroje, kdy není přesně známo, jaký bude počet lopatek stroje ani jejich tvar. Návrh vnější konstrukce včetně lopatek ještě není hotov a je plně v režii pracovníků strojní fakulty VUT.

Jak je vidno z obrázků, čerpadlo o navržených rozměrech by mělo být umístěno ve vodovodní trubce o průměru 200 mm. Jeho uchycení bude zajištěno pomocí konzole, která zároveň poslouží jako hřídel motoru, na které budou umístěny ložiska. Zpočátku návrhu se zdálo nevhodné použití ocelové hřídele, zejména kvůli obavě ze zvýšení ztrát v železe, eventuálně způsobených blízkostí magnetického pole statoru, jehož magnetické siločáry by se částečně uzavíraly přes tuto část stroje, avšak po bližším přezkoumání tohoto vlivu bylo zjištěno, že tento efekt není tak závažný. Použití ocelové hřídele, která by byla součástí upevňovací konzole, se tedy v konečném důsledku naopak zdá být výhodné a to z důvodu lepšího odvodu tepelných ztrát vznikajících ve statorovém vinutí a železe statoru. Konzole bude zároveň využita k přívodu napájecích kabelů k motoru.

Statorový a rotorový svazek bude tvořen dynamoplechy M330-35A. Ve statorovém svazku bude vloženo vinutí statoru, do drážek rotorového svazku se nasunou měděné tyče, které se na koncích spojí kruhy nakrátko.

Aby bylo dosaženo nejpříznivějšího odvodu tepla z vnitřní části stroje, je žádoucí, aby kostra a ložiskové štíty byly odlity z hliníku, kostra pak včetně lopatek čerpadla. V první, testovací konstrukční variantě stroje se však počítá s tiskem kostry a lopatek z plastu na 3D tiskárně, což však jednoznačně povede ke zhoršení její tepelné vodivosti a tedy i celkovému zhoršení odvodu tepla.

Tato varianta bude uvažována jako referenční. Jak již bylo zmíněno, dosud není známa výsledná konstrukční podoba čerpacího stroje, a tedy ani tvaru a počtu jeho lopatek, z tohoto důvodu bude při výpočtu tepelné sítě uvažována kostra stroje jako hladký válec.

Kostra, ložiskové štíty a rotor stroje budou k sobě uchyceny pomocí šroubů a jako celek budou tvořit rotační část stroje, která bude rototovat kolem pevné hřídele, na které bude umístěna dvojice ložisek (viz. Obr. 3.1 a Obr. 3.2).

Rozměry navržené konstrukce, které budou použity pro výpočet jednotlivých tepelných vodivostí stroje (v kapitole 4) jsou uvedeny v Tab. 3.1.

Tab. 3.1 Navržené rozměry stroje využitelné pro výpočet tepelné sítě

Veličina	Hodnota	Jednotka	Popis
Ložiskové štíty			
$D_{i\text{š}}$	94	[mm]	Vnitřní průměr štítu
$D_{o\text{š}}$	110	[mm]	Vnější průměr štítu
$a_{\text{š}}$	8	[mm]	Střední tloušťka štítu
$l_{\text{š}}$	30	[mm]	Délka válcové části štítu
Kostra			
$D_{o\text{k}}$	110	[mm]	Vnější průměr kostry
t_{k}	5	[mm]	Tloušťka kostry
$D_{i\text{k}}$	100	[mm]	Vnitřní průměr kostry
l_{k}	200	[mm]	Délka kostry

Pozn.: Tyto rozměry budou v rámci tepelného výpočtu modifikovány v závislosti na aktuálních rozměrech magnetického obvodu stroje.

4 TEPELNÝ VÝPOČET STROJE

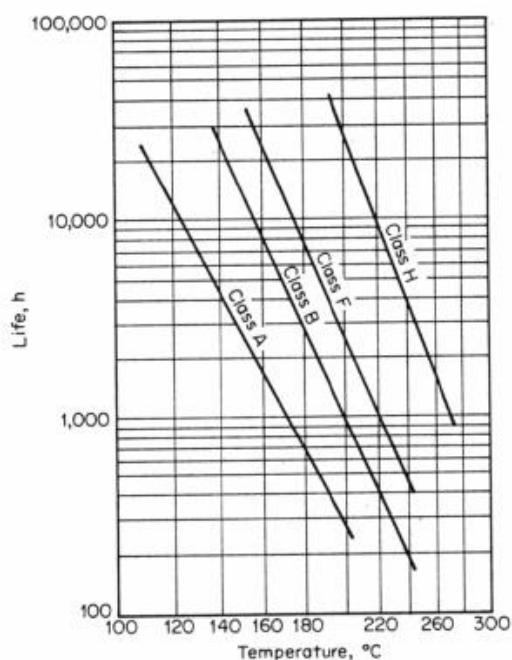
Princip asynchronního motoru (jako i jiných elektrických motorů) spočívá v přeměně vstupující elektrické energie na energii mechanickou. Při této přeměně dochází k tepelným ztrátám, které způsobují zahřívání jednotlivých částí stroje a zvyšují tak jejich teplotu. Způsob přenosu těchto ztrát je závislý na jejich velikosti a umístění v jednotlivých částech stroje, na geometrii stroje a způsobu jeho chlazení.

Z hlediska tepelného namáhání je nejcitlivějším místem izolace statorového vinutí, u které může, vlivem překročení dovolené teploty vinutí, dojít ke snížení její elektrické a mechanické pevnosti, což může vést k jejímu porušení a následnému mezizávítovému zkratu. Teplota vinutí je proto klíčovým parametrem, který je třeba znát při posuzování životnosti navrhovaného řešení. Hodnoty maximální dovolené teploty vinutí pro různé tepelné třídy izolace jsou uvedeny v Tab. 4.1.

Tab. 4.1 Tepelné třídy izolace [1]

Třída izolace	Maximální dovolená teplota vinutí [°C]
A	105
B	130
F	155
H	180

Zkušenosti se stavbou elektrických strojů dokazují, že překračování teplotního limitu významně snižuje životnost izolace. Závislost teploty statorového vinutí na životnosti izolace popisuje grafické znázornění na Obr. 4.1. [1,2]



Obr. 4.1 Závislost teploty statorového vinutí na životnosti izolace [1]

4.1 Sdílení tepla uvnitř a vně elektrického stroje

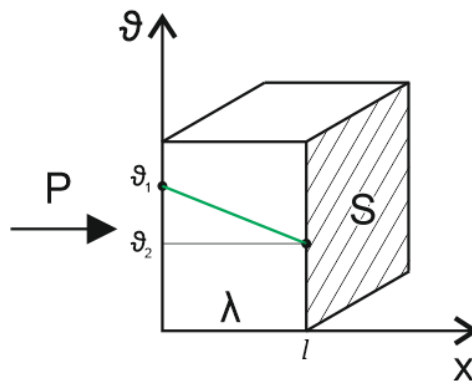
Na základě fyzikálních znalostí rozlišujeme celkem tři mechanismy přenosu tepla:

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

Přenos tepla uvnitř elektrického stroje probíhá primárně vedením, částečně prouděním. Vně stroje se pak uplatňuje způsob přenosu tepla prouděním.

4.1.1 Přenos tepla vedením

Princip, na kterém je tento způsob přenosu založen bude demonstrován na příkladu s jednoduchou rovinnou stěnou.



Obr. 4.2 Přenos tepla vedením jednoduchou rovinnou stěnou, upraveno z [5]

Do rovinné stěny o ploše S a tloušťce l vstupuje tepelný tok P . Mezi vstupní stranou stěny o teplotě ϑ_1 a výstupní stranou stěny o teplotě ϑ_2 existuje tzv. hmotné prostředí s měrnou tepelnou vodivostí λ . Velikost tepelného toku procházejícího touto stěnou je dána vztahem převzatým z [6]:

$$P = \frac{\lambda S}{l} (\vartheta_1 - \vartheta_2) = \frac{\lambda S}{l} \Delta\vartheta = G_{\vartheta} \Delta\vartheta = \frac{\Delta\vartheta}{R_{\vartheta}} \quad (4.1)$$

kde $\Delta\vartheta = (\vartheta_1 - \vartheta_2)$ představuje teplotní spád mezi vstupní a výstupní stranou stěny, který je ve směru pohybu tepelného toku vždy kladný, jelikož teplo je předáváno vždy od teplejšího povrchu stěny ke chladnějšímu. G_{ϑ} představuje tepelnou vodivost, která je převrácenou hodnotou tepelného odporu R_{ϑ} . [6,15]

4.1.2 Přenos tepla prouděním

Přenos tepla na hranici ohřátého povrchu tělesa a okolního prostředí reprezentuje vztah, který nazýváme jako Newtonův ochlazovací zákon převzatý z [15]:

$$P = \alpha S(\vartheta_1 - \vartheta_2) = \alpha S \Delta \vartheta \quad (4.2)$$

kde α představuje součinitel přestupu tepla z povrchu tělesa, S je povrch tělesa a $\Delta \vartheta$ je rozdíl teplot mezi povrchem tělesa a okolním prostředím.

Mechanismus přenosu tepla prouděním dále dělíme na tzv. přirozenou a nucenou konvekci. V rámci přirozené konvekce se bavíme o přenosu tepla, který není nijak ovlivněn vnějšími vlivy. Naproti tomu mechanismus, kterým se řídí tzv. nucená konvekce je na těchto vlivech závislý. Způsob, kterým konvekce probíhá, pak přímo ovlivňuje hodnotu α zkoumaného povrchu.

V rámci problematiky zkoumaného stroje je podstatná znalost vztahů pro výpočet součinitele přestupu tepla při nucené konvekci. Matematický popis tohoto přenosu je poměrně složitý a závisí na mnoha faktorech, zaslouží si proto samostatnou podkapitolu. [15]

4.1.2.1 Přenos tepla nucenou konvekcí [5,15]

Určení součinitele přestupu tepla při přenosu nucenou konvekcí je poměrně složitá záležitost, vyžadující náročných matematických výpočtů. V praxi se proto s výhodou využívá tzv. bezrozměrných čísel, jejichž výpočet je dán experimentálně stanovenými rovnicemi.

První z těchto čísel je tzv. Nusseltovo číslo, které je obecně definováno vztahem, který by převzat z [15]:

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} \quad (4.3)$$

kde λ je měrná tepelná vodivost chladícího média a L je tzv. charakteristický rozměr tělesa, kterým je u kruhového kanálu jeho průměr, jindy délka tělesa, aj. Obecně platí, že čím vyšší je Nusseltovo číslo, tím efektivnější je konvekce tepla z tělesa.

Dalším podstatným parametrem, používaným pro vyjádření přenosu tepla prouděním je tzv. Prandtlovo číslo, které je dáno vztahem převzatým z [15]:

$$Pr = \frac{\nu}{\frac{\lambda}{\rho C}} \quad (4.4)$$

kde ν je kinematická viskozita, ρ je hustota chladícího média a C je měrné teplo chladícího média. Hodnota Prandtlova čísla je dána druhem použitého média

a jeho teplotou. Tuto hodnotu lze pro nejčastěji používaná chladiva odečíst z tabulky. Pro vodní chladivo může Pr nabývat hodnoty 0,7 až 13,7.

Jiným z podstatných bezrozměrných čísel je tzv. Reynoldsovo číslo. Dle velikosti tohoto čísla lze mimo jiné zjistit, zda se jedná o proudění laminární nebo turbulentní. Okamžik, při kterém dochází k přenosu laminárního proudění na turbulentní je závislý na mnoha faktorech, mezi které patří geometrie, drsnost a teplota ochlazovaného povrchu, či rychlost proudění a druh chladicího média. Experimentálně bylo zjištěno, že velikost Reynoldsova čísla lze vyjádřit poměrem setrvačných sil k silám molekulárního tření, což lze vyjádřit vztahem dle [15]:

$$Re = \frac{vL}{\nu} \quad (4.5)$$

kde v je rychlost proudění chladiva a ν je jeho kinematická viskozita, kterou lze vyjádřit poměrem dynamické viskozity μ a hustoty chladiva ρ , jejichž hodnoty jsou závislé na teplotě a lze je vyčíst z Tab. A-9 literatury [15], následně lze provést přepočít dle zmíněného poměru tak jak je popsán v [15]:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4.6)$$

Hodnoty součinitelů tepelné vodivosti λ a součinitele přestupu tepla α stanovené pro některé z částí počítaného stroje, jsou uvedeny v Tab. 4.2. a 4.3. [2]

Tab. 4.2 Hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ použitých materiálů [2]

Označení	Název materiálu	λ [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
λ_{Cu}	Měď	380
λ_{Al}	Hliník	220
λ_{Pl}	Plast	0,2 až 0,4
$\lambda_{Fe\parallel}$	Elektrotechnická ocel (plechy); podél vrstev	48 až 19
$\lambda_{Fe\perp}$	Elektrotechnická ocel (plechy); napříč vrstev	1,2 až 0,87
$\lambda_{Fe\parallel}$	Izolace statorových drážek	0,16
λ_{vz}	Vzduch při 0,1 MPa, 70 °C	0,026
λ_v	Voda při 20 °C	0,599

Tab. 4.3 Hodnoty součinitele přestupu tepla α z částí stroje [4]

Označení	Součinitel přestupu tepla	α [W·m ⁻² ·K ⁻¹]
α_{bS}	Z boku železa statoru	35
α_{dR}	Z tyčí rotorové klece do železa rotoru	167

4.2 Výpočet teplot metodou tepelné sítě

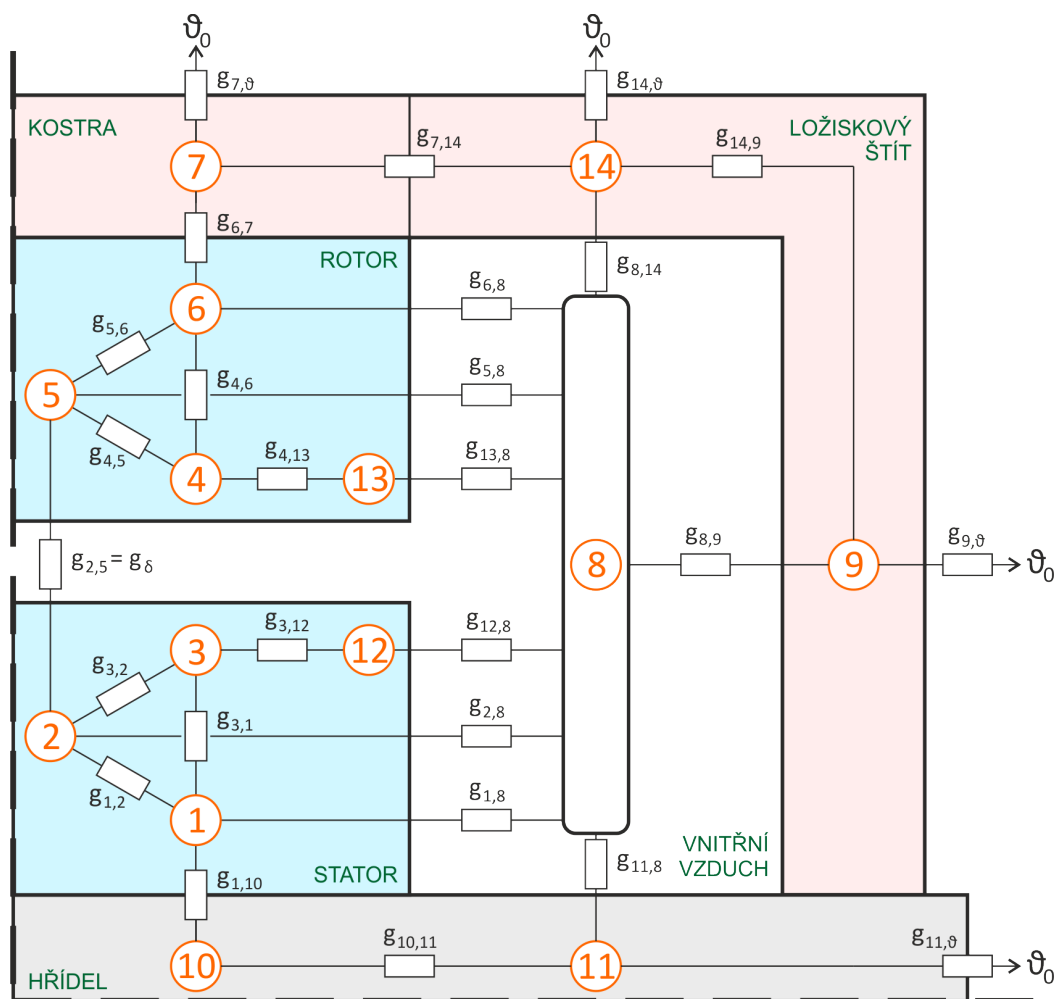
Výpočet teplot jednotlivých částí asynchronního stroje s vnějším rotorem bude proveden za použití metody tepelné sítě neboli metody ekvivalentního tepelného obvodu. Jak již název napovídá, principem této metody je sestavení jakéhosi náhradního tepelného obvodu, s tepelnými vodivostmi, a jeho řešení na základě tepelně-elektrických analogií.

Použití náhradního tepelného obvodu povede ke zjištění teplot jednotlivých částí stroje v ustáleném stavu. Tento obvod se skládá z uzlů, představujících jednotlivé části stroje, které mohou, ale nemusí být zdrojem tepelného toku (analogie s elektrickým zdrojem proudu). Velikosti tepelných toků (výkonů) odpovídají velikostem zjištěných elektrických ztrát. Pokud existuje tepelná vazba mezi jednotlivými uzly, jsou tyto uzly propojeny větvemi o tepelných vodivostech (analogie s elektrickou vodivostí), které jsou určeny na základě geometrických rozměrů stroje, součinitelů přestupu tepla a tepelných vodivostí. Výstup tohoto tepelného obvodu je připojen na společný potenciál o známe hodnotě, který představuje teplotu okolního prostředí (analogie s elektrickým zdrojem napětí).

Ve srovnání s elektrickým obvodem odpovídá tepelnému toku P elektrický proud I , rozdílu teplot $\Delta\vartheta$ odpovídá elektrické napětí U a tepelnému odporu R_{ϑ} , který je převrácenou hodnotou tepelné vodivosti G_{ϑ} , odpovídá elektrický odpor R . [6]

4.2.1 Navrh tepelné sítě

Pro zjednodušení byla tepelná síť navržena pouze pro polovinu stroje. Za předpokladu symetrického rozložení přestupu tepla na obou stranách stroje jsou pak hodnoty vodivostí v axiálním směru přenosu tepla, násobeny dvěma. Tepelná síť je tvořena 14 uzly, které jsou mezi sebou propojeny přes jednotlivé tepelné vodivosti. Celkově je v této síti, zobrazené na Obr. 4.3, obsaženo 26 tepelných vodivostí.



Obr. 4.3 Tepelné schéma asynchronního stroje s vnějším rotorem, sestaveno dle [4]

Tab. 4.4 Popis jednotlivých uzlů tepelného schématu

Uzel	Popis
1	Jho statoru
2	Zuby statoru
3	Vinutí statoru
4	Rotorová klec
5	Zuby rotoru
6	Jho rotoru
7	Kostra stroje
8	Vnitřní vzduch
9	Kruhové části ložiskových štítů (čela)
10	Hřídel pod statorovým paketem
11	Hřídel ve styku s vnitřním vzduchem
12	Čela vinutí statoru
13	Kruhy rotorové klece
14	Válcové části ložiskových štítů

4.2.2 Výpočet tepelných vodivostí [4]

Vztahy uvedené v rámci této podkapitoly byly sestaveny převážně na základě znalostí z [4] a přepracovány tak, aby je bylo možné použít pro stroj s vnějším rotorem. Určení korektních vztahů, pro výpočet tepelných vodivostí, respektujících nucený přenos tepla z ohřátého povrchu stroje do okolního prostředí vyžaduje rozsáhlejších znalostí z fyziky tepelného přenosu, které jsou čerpány z [15] a jsou uvedeny v podkapitole 5.1.2.1. Význam jednotlivých symbolů, které nejsou u jednotlivých vztahů zmíněny, jsou mj. uvedeny na konci této práce.

Tepelné vodivosti na rozhraní statoru

Tepelná vodivost mezi jhem a zuby statoru:

$$g_{1,2} = \lambda_{Fe\parallel} \cdot \frac{1}{\frac{H_S}{3 \cdot S_{zS\parallel}} + \frac{h_{jS}}{2 \cdot S_{jS\parallel}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta P_{jS}}{3 \cdot \Delta P_{zS}} + \frac{l_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot 2 \cdot Q_S}{R_{zS}}\right)} \quad (4.7)$$

kde R_{zS} je dán vztahem:

$$R_{zS} = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\left(\beta_S + \frac{1}{\beta_S} \right) \cdot \ln \frac{1 + \beta_S}{1 - \beta_S} + 2 \ln \frac{\frac{1}{\beta_S} - \beta_S}{4} \right) \quad (4.8)$$

kde β_S je dán poměrem:

$$\beta_S = \frac{b_{zS}}{b_{zS} + b_{S2}} \cdot k_{\beta S} \quad (4.9)$$

kde $k_{\beta S}$ je součinitel tepelného odporu mezi zubem a jhem statoru.

Tepelná vodivost mezi jhem statoru a statorovým vinutím:

$$g_{3,1} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{k_{d1}}{S_{dJS}} + \frac{h_{jS}}{2 \cdot \lambda_{Fe\parallel} \cdot S_{jS\parallel}}}} \quad (4.10)$$

kde $\frac{1}{k_{d1}}$ je dán součtem měrného tepelného odporu drážkové izolace a měrného tepelného odporu ekvivalentní vrstvy vzduchu mezi vinutím a železem statoru:

$$\frac{1}{k_{d1}} = \frac{1}{k_{ds}} + \frac{1}{k_{vs}} \quad (4.11)$$

Tepelná vodivost mezi zuby statoru a statorovým vinutím:

$$g_{3,2} = \frac{S_{dzS}}{\frac{1}{k_{d1}}} \quad (4.12)$$

Tepelná vodivost statorového vinutí ze středu statorového svazku k jeho čelům:

$$g_{3,12} = 2 \cdot \frac{6 \cdot \lambda_{Cu} \cdot S_{Cu}}{l_{Cu}} \quad (4.13)$$

Tepelná vodivost mezi boky statorových zubů a vnitřním vzduchem:

$$g_{2,8} = 2 \cdot \frac{S_{zS}}{\frac{l_{Fe}}{6 \cdot \lambda_{Fe\perp}} + \frac{1}{\alpha_{bS}}} \quad (4.14)$$

Tepelná vodivost mezi boky statorového jha a vnitřním vzduchem:

$$g_{1,8} = g_{2,8} \cdot \frac{S_{jS}}{S_{zS}} \quad (4.15)$$

Tepelná vodivost mezi čely statorového vinutí a vnitřním vzduchem:

$$g_{12,8} = 2 \cdot \alpha_{\xi S} \cdot S_{\xi S} \quad (4.16)$$

kde $\alpha_{\xi S}$ je součinitel přestupu tepla z čela vinutí, který je dán vztahem:

$$\alpha_{\xi S} = \frac{1}{\frac{1}{25 \cdot (1 + 0,5 \cdot (0,5 \cdot u_2)^{0,7}) \cdot \xi_{\xi S}} + \frac{1}{k_{\xi S}}} \quad (4.17)$$

kde $\xi_{\xi S}$ je součinitel zvýšení přestupu tepla z čel vinutí, $\frac{1}{k_{\xi S}}$ je měrný tepelný odpor izolace čel vinutí (pokud jsou čela neizolované pak za tento člen dosadíme nulu) a u_2 je vnitřní obvodová rychlost rotoru, která je daná vztahem:

$$u_2 = \frac{\pi}{60} \cdot D_{iR} \cdot n_n \quad (4.18)$$

Teplené vodivosti na rozhraní rotoru

Tepelná vodivost mezi tyčemi rotorové klece a zuby rotoru:

$$g_{4,5} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{0,026}{\varepsilon_t} \cdot S_{t\parallel}} + \frac{1}{\alpha_{dR} \cdot S_{t\parallel}}} \quad (4.19)$$

kde ε_t je tloušťka ekvivalentní vrstvy vzduchu mezi tyčemi a železem statoru.

Tepelná vodivost mezi jhem a zuby rotoru:

$$g_{5,6} = \lambda_{Fe\parallel} \cdot \frac{1}{\frac{H_R}{3 \cdot S_{zR\parallel}} + \frac{h_{jR}}{2 \cdot S_{jR\parallel}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta P_{jR}}{3 \cdot \Delta P_{zR}} + \frac{l_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot 2 \cdot Q_R}{R_{zR}}\right)} \quad (4.20)$$

kde R_{zR} je dán vztahem:

$$R_{zR} = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\left(\beta_R + \frac{1}{\beta_R} \right) \cdot \ln \frac{1 + \beta_R}{1 - \beta_R} + 2 \ln \frac{\frac{1}{\beta_R} - \beta_R}{4} \right) \quad (4.21)$$

kde β_R je dán poměrem:

$$\beta_R = \frac{b_{zR}}{b_{zR} + b_{R2}} \cdot k_{\beta R} \quad (4.22)$$

kde $k_{\beta R}$ je součinitel tepelného odporu mezi zubem a jhem rotoru.

Tepelná vodivost mezi tyčemi rotorové klece a rotorovým jhem:

$$g_{4,6} = \frac{1}{\frac{1}{S_{djR} \cdot \alpha_{dR}} + \frac{h_{jR}}{2 \cdot \lambda_{Fe\parallel} \cdot S_{jR\parallel}}} \quad (4.23)$$

Tepelná vodivost mezi tyčemi rotoru a rotorovými kruhy:

$$g_{4,13} = 2 \cdot \frac{6 \cdot \lambda_{Cu} \cdot S_t}{l_{Fe}} \quad (4.24)$$

Tepelná vodivost mezi rotorovými kruhy a vnitřním vzduchem:

$$g_{13,8} = 2 \cdot \alpha_{\check{c}R} \cdot S_{\check{c}R} \quad (4.25)$$

kde $\alpha_{\check{c}R}$ je součinitel přestupu tepla z rotorových kruhů, který je dán vztahem:

$$\alpha_{\check{c}R} = \xi_{\check{c}R} \cdot 28,8 \cdot \sqrt{u_2} \quad (4.26)$$

kde $\xi_{\check{c}R}$ je součinitel zvýšení přestupu tepla z rotorových kruhů.

Tepelná vodivost mezi boky zubů rotoru a vnitřním vzduchem:

$$g_{5,8} = 2 \cdot \frac{S_{zR}}{\frac{l_{Fe}}{6 \cdot \lambda_{Fe\perp}}} \quad (4.27)$$

Tepelná vodivost mezi jhem rotoru a vnitřním vzduchem:

$$g_{6,8} = g_{5,8} \cdot \frac{S_{jR}}{S_{zR}} \quad (4.28)$$

Tepelná vodivost vzduchové mezery:

$$g_{2,5} = \frac{1}{\frac{1}{g_{\delta S}} + \frac{1}{g_{\delta R}}} \quad (4.29)$$

kde $g_{\delta S}$ je tepelná vodivost vzduchové mezery ze strany statoru daná vztahem:

$$g_{\delta S} = \frac{1}{\frac{H_S}{2 \cdot \lambda_{Fe\parallel} \cdot S_{zS\parallel}} + \frac{1}{\alpha_{\delta} \cdot S_{\delta S}}} \quad (4.30)$$

kde hodnota α_{δ} je určena jako maximum z hodnot $\alpha_{\delta 1}$ a $\alpha_{\delta 2}$:

$$\alpha_{\delta 1} = 3,54 \cdot \sqrt{\frac{u_2}{\sqrt{D_{oS}} \cdot \delta}} \quad (4.31)$$

$$\alpha_{\delta 2} = 2 \cdot \frac{0,029}{\delta} \quad (4.32)$$

$$\alpha_{\delta} = \max(\alpha_{\delta 1}; \alpha_{\delta 2}) \quad (4.33)$$

Tepelná vodivost vzduchové mezery ze strany rotoru $g_{\delta R}$ je dána vztahem:

$$g_{\delta R} = \frac{1}{\frac{H_R}{2 \cdot \lambda_{Fe\parallel} \cdot S_{zR\parallel}} + \frac{1}{\alpha_{\delta} \cdot S_{\delta R}}} \quad (4.34)$$

Teplené vodivosti na rozhraní kostry

Tepelná vodivost mezi rotorovým jhem a kostrou:

$$g_{6,7} = \frac{1}{\frac{1}{g_{rk}} + \frac{1}{g_{pjR}}} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{0,026 \cdot S_{r,k}}{\varepsilon_{rk}}} + \frac{1}{\frac{\lambda_{Fe\parallel} \cdot S_{jR\parallel}}{h_{jR}} \cdot 2}} \quad (4.35)$$

kde ε_t je tloušťka ekvivalentní vrstvy vzduchu mezi rotorovým svazkem a kostrou.

Tepelná vodivost mezi ložiskovými štíty a kostrou:

$$g_{7,14} = \frac{1}{\frac{1}{0,026 \cdot S_{k,\check{s}}} + \frac{1}{\frac{\lambda_k \cdot S_{k,\check{s}}}{l_{\check{s}}} \cdot 2}} \quad (4.36)$$

kde ε_{ks} je tloušťka ekvivalentní vrstvy vzduchu (včetně uvažované těsnící vrstvy) mezi kostrou a ložiskovými štíty.

Tepelná vodivost mezi kostrou a vnějším okolím:

$$g_{7,v} = \frac{1}{\frac{1}{g_k} + \frac{1}{g_{kv}}} \quad (4.37)$$

kde g_k je tepelná vodivost kostry v radiálním směru:

$$g_k = \frac{\lambda_k \cdot S_{k,o}}{t_k} \quad (4.38)$$

Proměnná g_{kv} představuje tepelnou vodivost mezi povrchem kostry a okolním chladičem:

$$g_{kv} = \alpha_k \cdot S_{k,o} \quad (4.39)$$

kde α_k je součinitel přestupu tepla z povrchu kostry do okolního chladiwa daný vztahem:

$$\alpha_k = Nu \cdot \frac{\lambda_v}{l_{Fe}} \quad (4.40)$$

kde λ_v je součinitel tepelné vodivosti chladiwa (vody) a Nu je Nusseltovo číslo, které vypočítáme za pomoci vztahu určeného pro mechanismus proudění vody obtékající hladkou stěnu válce [15]:

$$Nu = 0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (4.41)$$

kde Re je Reynoldsovo číslo vypočítané dle vztahu (4.5) a Pr je Prandtlovo číslo zjištěné z tabulky (Tab. A-9 v literatuře [15]).

Pro zjištění hodnoty Re je nutné znát viskozitu chladiwa, charakteristický rozměr tělesa a rychlost proudění chladiwa, kterou vypočítáme z požadované hodnoty objemového průtoku vody Q_v :

$$v_v = \frac{Q_v}{S} \quad (4.42)$$

Tepelné vodivosti na rozhraní ložiskových štítů

Tepelná vodivost mezi válcovou a kruhovou částí ložiskových štítů:

$$g_{14,9} = 2 \cdot \frac{\lambda_{Al} \cdot S_{švk}}{\frac{D_{šo} + l_{šcelk}}{2}} \quad (4.43)$$

Tepelná vodivost mezi válcovou částí ložiskových štítů a vnitřním vzduchem:

$$g_{8,14} = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot S_{šv} \cdot \alpha_{ši} \quad (4.44)$$

kde $\alpha_{ši}$ je součinitel přestupu tepla na vnitřní straně ložiskových štítů:

$$\alpha_{ši} = 14 \cdot (1 + \sqrt{0,5 \cdot u_2}) \cdot \xi_{ši} \quad (4.45)$$

kde $\xi_{ši}$ je součinitel zvýšení přestupu tepla na vnitřní straně ložiskových štítů.

Tepelná vodivost mezi kruhovou částí ložiskových štítů a vnitřním vzduchem:

$$g_{8,9} = 2 \cdot S_{ški} \cdot \alpha_{ši} \quad (4.46)$$

Tepelná vodivost mezi kruhovou částí ložiskových štítů a vnějším okolím:

$$g_{9,v} = 2 \cdot \frac{1}{\frac{1}{g_{š1}} + \frac{1}{g_{šk}}} \quad (4.47)$$

kde $g_{š1}$ je tepelná vodivost kruhové částí ložiskového štítu v axiálním směru:

$$g_{š1} = \frac{\lambda_{Al} \cdot S_{ško}}{a_{š}} \quad (4.48)$$

Proměnná $g_{šk}$ představuje tepelnou vodivost mezi povrchem kruhové části ložiskového štítu a okolním chladivem:

$$g_{šk} = \alpha_{šk} \cdot S_{ško} \quad (4.49)$$

kde $\alpha_{šk}$ je součinitel přestupu tepla z povrchu kruhové části ložiskového štítu do okolního chladiva daný vztahem:

$$\alpha_{šk} = Nu_k \cdot \frac{\lambda_v}{D_{šo}} \quad (4.50)$$

kde Nu_k je Nusseltovo číslo pro kruhový tvar tělesa odvozené dle [15], jako charakteristický rozměr zde figuruje vnější průměr štítu:

$$Nu_k = 0,193 \cdot Re^{0,618} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \quad (4.51)$$

Tepelná vodivost mezi válcovou částí ložiskových štítů a vnějším okolím:

$$g_{14,v} = 2 \cdot \frac{1}{\frac{1}{g_{s2}} + \frac{1}{g_{sv}}} \quad (4.52)$$

kde g_{s2} je tepelná vodivost válcové částí ložiskového štítu v radiálním směru:

$$g_{s2} = \frac{\lambda_{Al} \cdot S_{sv}}{a_{sv}} \quad (4.53)$$

Proměnná g_{sk} představuje tepelnou vodivost mezi povrchem válcové části ložiskového štítu a okolním chladivem:

$$g_{sv} = \alpha_{sv} \cdot S_{sv} \quad (4.54)$$

kde α_{sv} je součinitel přestupu tepla z povrchu válcové části ložiskového štítu do okolního chladiva daný vztahem:

$$\alpha_{sv} = Nu_v \cdot \frac{\lambda_v}{D_{so}} \quad (4.55)$$

kde Nu_v je Nusseltovo číslo pro válcový tvar tělesa, pro jehož výpočet lze použít vztah (4.41).

Tepelné vodivosti na rozhraní hřídele

Tepelná vodivost mezi statorovým jhem a hřídelí:

$$g_{1,10} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{0,026 \cdot S_h}{\varepsilon_h}} + \frac{1}{\frac{\lambda_{Fe\parallel} \cdot S_{js\parallel}}{h_{js}} \cdot 2}} \quad (4.56)$$

kde ε_h je tloušťka ekvivalentní vrstvy vzduchu mezi statorovým jhem a hřídelí.

Tepelná vodivost mezi částí hřídele pod jhem statoru a částmi hřídele ve styku s vnitřním vzduchem:

$$g_{10,11} = 2 \cdot \frac{\lambda_h \cdot S_{h\parallel}}{\frac{l_s}{2}} \quad (4.57)$$

kde λ_h je součinitel tepelné vodivosti materiálu, ze kterého je hřídel vyrobena.

Tepelná vodivost mezi hřídelí a vnějším okolím:

$$g_{11,v} = 2 \cdot \frac{1}{\frac{1}{\frac{\lambda_{Fe\parallel} \cdot S_{js\parallel}}{h_{js}} \cdot 2} + \frac{1}{g_{hvv}}} \quad (4.58)$$

kde g_{hvv} je tepelná vodivost mezi povrchem hřídele a okolním chladičem, kterou nelze za současné situace jednoznačně matematicky definovat, a to z důvodu neznalosti výsledné podoby upevňovací konzole, která je součástí hřídele.

Uvedené plochy částí počítaného stroje a styčné plochy mezi jednotlivými částmi jsou dány geometrickým uspořádáním stroje. Byla odvozeny všechny potřebné vztahy pro výpočet tepelných vodivostí navrženého stroje, které je třeba znát pro výpočet tepelné sítě. Tato tepelná síť je počítána za pomoci matice sestavené v následující kapitole. Jak již bylo uvedeno, dosud není znám přesný tvar lopatek čerpadla, upevňovací konzole, a především materiál, ze kterého budou tyto části vyrobeny. Motor, který bude dle výsledného návrhu sestaven, má za účel ověřit funkčnost čerpadla tohoto typu. Je tedy pravděpodobné, že pro laboratorní účely bude kostra čerpadla, včetně lopatek, vytištěna z plastu na 3D tiskárně.

4.2.3 Sestavení matic a jejich řešení [4]

Dle metody uzlových napětí, odvozených na základě druhého Kirchhoffova zákona, byla sestavena matice pro tepelnou síť navrženou v kap. 4.2.1. Matice tepelných vodivostí G :

$$G = \begin{pmatrix} G_1 & -g_{1,2} & -g_{1,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & -g_{1,8} & 0 & -g_{1,10} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -g_{1,2} & G_2 & -g_{3,2} & 0 & -g_{2,5} & 0 & 0 & -g_{2,8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -g_{1,3} & -g_{3,2} & G_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g_{3,12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_4 & -g_{4,5} & -g_{4,6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g_{4,13} & 0 \\ 0 & -g_{2,5} & 0 & -g_{4,5} & G_5 & -g_{5,6} & 0 & -g_{5,8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -g_{4,6} & -g_{5,6} & G_6 & -g_{6,7} & -g_{6,8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g_{6,7} & G_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g_{7,14} \\ -g_{1,8} & -g_{2,8} & -g_{3,8} & 0 & -g_{5,8} & -g_{6,8} & 0 & G_8 & -g_{8,9} & 0 & -g_{11,8} & -g_{12,8} & -g_{13,8} & -g_{8,14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g_{8,9} & G_9 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g_{9,14} \\ -g_{1,10} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{10} & -g_{10,11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g_{11,8} & 0 & -g_{10,11} & G_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -g_{3,12} & 0 & 0 & 0 & 0 & -g_{12,8} & 0 & 0 & 0 & G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -g_{4,13} & 0 & 0 & 0 & -g_{13,8} & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g_{7,14} & -g_{8,14} & -g_{9,14} & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{14} \end{pmatrix}$$

kde indexy 1-14 odpovídají uzlům tepelného schématu (viz. Obr. 4.3), a tedy i jednotlivým částem stroje dle Tab. 4.4.

Fiktivní tepelné vodivosti G_1 až G_{14} , tvořící diagonálu vodivostní matice G , jsou dány součtem tepelných vodivostí vstupujících do i -tého uzlu tepelného schématu:

$$\begin{aligned}
 G_1 &= g_{1,2} + g_{1,8} + g_{3,1} + g_{1,10}, \\
 G_2 &= g_{1,2} + g_{2,5} + g_{3,2} + g_{2,8}, \\
 G_3 &= g_{3,1} + g_{3,2} + g_{3,12}, \\
 G_4 &= g_{4,5} + g_{4,6} + g_{4,13}, \\
 G_5 &= g_{2,5} + g_{4,5} + g_{5,6} + g_{5,8}, \\
 G_6 &= g_{5,6} + g_{6,7} + g_{6,8} + g_{4,6}, \\
 G_7 &= g_{6,7} + g_{7,14} + g_{7,\vartheta}, \\
 G_8 &= g_{1,8} + g_{2,8} + g_{5,8} + g_{6,8} + g_{8,9} + g_{11,8} + g_{12,8} + g_{13,8} + g_{8,14}, \\
 G_9 &= g_{8,9} + g_{9,\vartheta}, \\
 G_{10} &= g_{1,10} + g_{10,11}, \\
 G_{11} &= g_{10,11} + g_{11,8} + g_{11,\vartheta}, \\
 G_{12} &= g_{3,12} + g_{12,8}, \\
 G_{13} &= g_{4,13} + g_{13,8}, \\
 G_{14} &= g_{7,14} + g_{8,14} + g_{14,9} + g_{14,\vartheta}.
 \end{aligned}$$

Matice teplot jednotlivých částí stroje ϑ :

$$\vartheta = \begin{pmatrix} \vartheta_1 \\ \vdots \\ \vartheta_{14} \end{pmatrix}$$

Matice tepelných toků P :

$$P = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 + g_{7,\vartheta}\vartheta_o \\ P_8 \\ P_9 + g_{7,\vartheta}\vartheta_o \\ P_{10} \\ P_{11} + g_{11,\vartheta}\vartheta_o \\ P_{12} \\ P_{13} \\ P_{14} + g_{14,\vartheta}\vartheta_o \end{pmatrix}$$

Vztah mezi sestavenými maticemi lze zapsat v obecném tvaru jako:

$$G \cdot \vartheta = P \quad (4.59)$$

Za předpokladu, že hodnoty matice tepelných vodivostí G a matice tepelných toků P jsou známy, lze hodnotu matice teplot ϑ zjistit použitím inverzní matice G^{-1} :

$$\vartheta = G^{-1} \cdot P \quad (4.60)$$

Hodnoty prvků matice ϑ_1 až ϑ_{14} odpovídají hledaným teplotám jednotlivých částí stroje. Tyto hodnoty jsou pro přehlednost uvedeny v Tab. 4.5. Hodnoty odpovídají tepelným poměrům stroje při uvažované teplotě chladicí vody $\vartheta_0 = 20^\circ\text{C}$. [6]

Tab. 4.5 Vypočtené hodnoty teplot jednotlivých částí stroje při okolní teplotě vody $\vartheta_0 = 20^\circ\text{C}$

Uzel	Popis	Teplota ϑ [$^\circ\text{C}$]
1	Jho statoru	137,33
2	Zuby statoru	135,45
3	Vinutí statoru	145,09
4	Rotorová klec	100,58
5	Zuby rotoru	98,69
6	Jho rotoru	94,98
7	Kostra stroje	89,20
8	Vnitřní vzduch	98,23
9	Kruhové části ložiskových štítů (čela)	21,20
10	Hřídel pod statorovým paketem	137,28
11	Hřídel ve styku s vnitřním vzduchem	92,67
12	Čela vinutí statoru	138,63
13	Kruhy rotorové klece	100,70
14	Válcové části ložiskových štítů	20,27

Výsledky uvedené v Tab. 4.5 odpovídají hodnotám ztrát vypočítaných programem Ansys Maxwell, při uvažování stroje s plastovou kostrou a hřídelí. Z uvedené tabulky vypočítaných teplot je nejdůležitější teplota vinutí statoru (ϑ_3), která za daných parametrů a geometrických rozměrů stroje vyšla $145,09^\circ\text{C}$. Aby bylo dosaženo co nejvyšší spolehlivosti navrhovaného řešení, bude použita izolace statorového vinutí o tepelné třídě H, která by měla vydržet tepelné namáhání až 180°C (viz. Tab. 4.1), což je teplota, která bude považovat za hraniční hodnotu teploty vinutí navrhovaného optimalizačního algoritmu.

5 OPTIMALIZACE METODOU GENETICKÉHO ALGORITMU Z HLEDISKA ROZMĚRŮ STROJE

Pod pojmem „optimalizace“ se skrývá proces, jehož úkolem je vyhledat optimální neboli nejvhodnější řešení daného problému. Přesněji jde o stav systému, který nejlépe vyhovuje kombinaci požadovaných parametrů. Optimalizaci řídí algoritmus sloužící k nalezení globálního extrému (minimum, maximum) předepsané ohodnocující funkce [13].

Genetický algoritmus (zkráceně GA) je optimalizační metoda založená na principu evoluční biologie a přirozeného výběru. Algoritmus je považován za heuristický, mající za cíl nalézt přijatelné řešení v přijatelném čase, a stochastický, jelikož zahrnuje účinky řady náhodných vlivů (selekce, mutace).

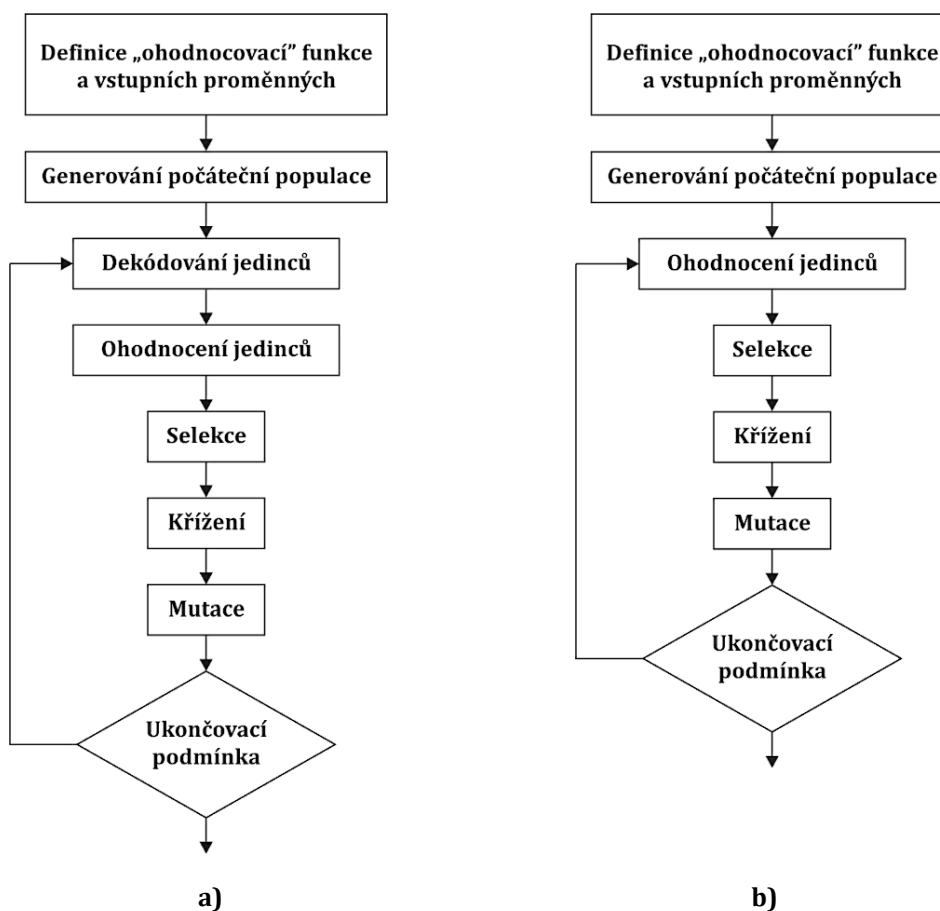
GA pracuje s populací jedinců, kteří v sobě zahrnují způsob řešení daného problému. Ke každému z těchto jedinců je přiřazeno hodnocení, vyjadřující míru vhodnosti tohoto řešení a současně je jakýmsi kritériem jeho reprodukční způsobilosti. Možnost vzájemné reprodukce je dána použitím imitace přirozeného výběru (selekce) ve spojení s geneticky inspirovanými operátory křížení a mutace. Reprodukované potomstvo, sestávající z nových jedinců, je pak začleněno do populace, ve které nahrazuje její nejslabší články (jedince). Proces hodnocení, selekce, křížení a mutace se poté opakuje n -krát, kde n značí počet generací, které chceme v dané populaci zkoumat. [11]

Z praktického pohledu si lze pod činností GA představit práci konstruktéra, hodnotícího výsledky svých výpočtů, na jejichž základě upravuje vstupní hodnoty tak, aby dosáhl co nejlepšího řešení. Jak konstruktér, tak i GA při svém snažení vyhledávají ty oblasti možných řešení, které mají nejlepší předpoklad pro výskyt optimálního řešení, a poté se orientují na nejzajímavější z nich. Avšak značnou nevýhodou GA oproti práci konstruktéra je absence znalostí a zkušeností v dané problematice, kterou je nutné vyvážit určitou mírou provázanosti GA se systémem, který tento algoritmus řeší. Genetický algoritmus je snadno modifikovatelný a v rukou šikovného konstruktéra se tak může stát silným nástrojem při řešení různorodých konstrukčních problémů, kdy lze dosáhnout značné úspory času a zefektivnění práce. [12]

5.1 Sestavení genetického algoritmu

Dříve než se pustíme do samotné tvorby GA, je nutné si uvědomit, se kterými proměnnými chceme pracovat, jestli se spojitými, nebo diskrétními a na základě tohoto rozhodnutí pak GA realizovat. Oba druhy algoritmu mají téměř totožný model založený na genetické rekombinaci a přirozeném výběru, avšak struktura

binárního GA je o něco složitější, jelikož vyžaduje dekodování jedinců, představujících jednotlivé proměnné reprezentované bity 1 a 0. Naproti tomu spojitý GA pracuje s proměnnými obsahujícími čísla s plovoucí řádovou čárkou, proto je také třeba počítat s odlišným způsobem zápisu operátoru křížení a mutace. Struktury obou algoritmů a rozdíl mezi nimi je zřejmý z Obr. 5.1. [13]



Obr. 5.1 Diagram a) binárního genetického algoritmu, b) spojitého genetického algoritmu, sestaveno dle [13]

Proměnné, se kterými se bude v rámci této diplomové práce pracovat, jsou spojitě s plovoucí řádovou čárkou, zaměříme se tedy na programování funkce spojitého genetického algoritmu.

V následujících podkapitolách se seznámíme s jednotlivými částmi algoritmu, představenými v rámci diagramu uvedeného na Obr. 5.1 b.

5.1.1 Definice „ohodnocovací“ funkce

V rámci řešené práce je optimalizace stroje prováděna tak, aby bylo dosaženo co nejmenších rozměrů, avšak s podmínkou toho, že nebude překročena maximální dovolená teplota vinutí, nebo snížen výkon stroje pod stanovenou mez.

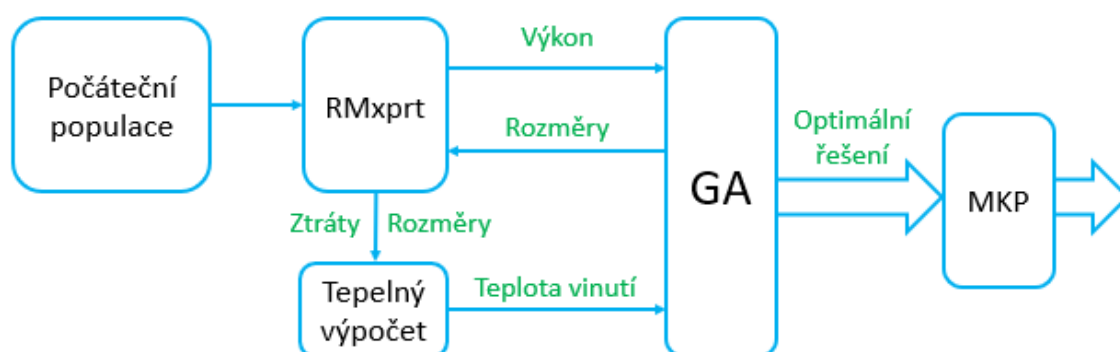
Proto je nezbytně nutné navrhnout ohodnocující funkci tak, aby tyto omezující podmínky plně respektovala. Toho lze docílit použitím tzv. penalizační metody, kdy v případě, že dojde k porušení některé z podmínek, bude daný jedinec ohodnocen tak vysokou hodnotou (za předpokladu, že nejnižší hodnota = nejvyšší ohodnocení), aby byla co nejvíce snížena pravděpodobnost jeho křížení s ostatními jedinci. [11]

Pro zjištění, zda nebyla překročena dovolená teplotní mez je tedy nezbytně nutné, aby součástí ohodnocující funkce byla funkce zajišťující tepelný výpočet stroje dle navržené tepelné sítě. Vstupem této funkce jsou pak hodnoty všech parametrů daného jedince, ztráty vyčíslené programem RMxpřt a ostatní konstantní parametry stroje. Výstupem této funkce je pak teplota statorového vinutí, která nesmí překročit maximální dovolenou teplotu izolace statorového vinutí, která je v našem případě 180 °C (tepelná izolace třídy H).

Hodnocení z hlediska výkonových parametrů pak probíhá na základě kontroly, zda nedošlo k překročení spodní hodnoty požadovaného výkonu, čehož je docíleno porovnáním minimální možné hodnoty momentu, vypočítaného dle (2.1) s momentem vypočítaným programem RMxpřt.

Pokud tedy dojde k překročení jedné z výše uvedených mezí, pak je jedinec ohodnocen několikanásobkem hodnoty teploty vinutí, která byla pro něj vyčíslena. Jestliže je však výsledek tohoto ověření negativní, je danému jedinci přiřazena hodnota odpovídající číselnému součinu délky a vnějšího průměru rotorového svazku.

V rámci námi použitého GA jde tedy o nalezení minimálního objemového rozměr stroje, který bude ještě schopen odolávat tepelným účinkům proudu, přičemž jeho výkon nepoklesne pod stanovanou mez. Zjednodušené schéma optimalizačního procesu aplikovaného v rámci konkrétního řešení je znázorněno na Obr. 5.2.



Obr. 5.2 Zjednodušené schéma optimalizačního procesu v rámci konkrétní situace

5.1.2 Definice proměnných a generování počáteční populace

Populace námi tvořeného genetického algoritmu sestává z matice o rozměrech $N_{\text{pop}} \times N_{\text{par}}$, kde N_{pop} představuje počet jedinců umístěných v populaci a N_{par} množství proměnných neboli parametrů každého jedince. V našem případě je populace tvořena 20 jedinci, z nichž každý je reprezentován 8 parametry, jedná se tedy o matici o velikosti 20×8 . Každý z těchto parametrů představuje reálné číslo s plovoucí řádovou čárkou. Inicializace takto deklarované populace je provedena tak, že pro každý parametr daného jedince je přiřazeno náhodně zvolené číslo z intervalu ohraničeného horní a dolní mezí. Tyto meze jsou stanoveny pro každý parametr zvlášť, a jejich velikost může (ale nemusí) být závislá na velikosti ostatních parametrů jedince. Pokud tomu tak je, pak je nezbytně nutné dbát na to, aby se tyto meze vždy přizpůsobovaly dle aktuálních „rysů“ daného jedince. Například pokud se zmenší velikost statorové drážky, musí být zároveň snížena horní mez počtu vodičů této drážky, aj.

Na takto vygenerovanou počáteční populaci je následně aplikována ohodnocující funkce, poté je populace seřazena sestupně dle míry ohodnocení každého jedince. Příklad, jak může vypadat takto seřazená populace, včetně jejího ohodnocení je znázorněn v Tab. 5.1. [13]

Tab. 5.1 Vypočtené hodnoty

Pořadí jedince	l_{Fe}	D_{IS}	D_{OS}	D_{OR}	h_{s2}	d_t	Q_R	N_{zav}	M_n	ϑ_3	Ohodnocení jedince
	[mm]						[-]		[Nm]	[°C]	
1	93,8	17,5	55,7	98,1	7,2	6,0	21	44	4,50	153,46	1993,1
2	108,4	18,6	67,2	85,2	7,2	5,4	25	44	4,50	131,21	2106,4
3	111,3	18,8	63,1	95,7	7,2	6,6	21	44	4,51	147,71	2110,0
4	109,2	15,3	67,2	97,6	7,2	6,4	23	44	4,28	155,05	2198,6
5	112,2	17,7	63,1	97,1	7,2	6,5	23	44	4,57	122,65	2206,5
6	112,8	18,3	65,2	97,8	7,2	6,6	23	44	4,56	135,06	2484,1
7	113,7	17,9	63,8	97,2	7,2	6,5	23	44	4,66	109,93	2537,9
8	118,2	21,7	68,3	98,2	7,4	6,6	23	45	4,19	119,43	2783,5
9	119,0	18,1	68,0	98,3	7,2	6,8	23	44	4,57	125,62	2800,2
10	129,9	22,1	68,6	98,3	7,4	6,9	24	45	4,35	102,95	3052,0
11	128,4	24,8	67,5	94,1	7,4	4,5	24	45	2,05	99,81	penalizován
12	128,7	22,1	67,4	97,9	7,2	6,5	23	45	3,96	107,88	penalizován
13	112,8	18,4	65,8	95,0	7,2	6,7	21	44	4,19	199,62	penalizován
14	99,7	17,8	67,4	97,8	7,2	6,5	23	44	4,45	200,41	penalizován
15	122,4	18,6	54,8	98,6	7,9	6,8	23	33	8,38	309,80	penalizován
16	80,9	18,3	67,5	98,2	7,2	6,8	23	44	4,97	426,89	penalizován
17	110,4	17,7	61,6	96,9	7,2	6,1	23	20	15,35	3707,6	penalizován
18	93,2	16,8	53,3	98,1	7,1	5,2	21	20	13,50	4940,2	penalizován
19	86,8	16,4	56,1	88,9	7,1	5,8	23	20	15,66	7990,1	penalizován
20	90,9	17,3	53,4	72,5	7,2	4,7	22	20	8,10	16006	penalizován

Z tabulky 5.1 je zřejmé, že do procesu optimalizace v rámci genetického algoritmu zasahuje celkem osm proměnných parametrů stroje, kde l_{Fe} je délka statorového a rotorového svazku, D_{is} vnitřní průměr statoru, D_{os} vnější průměr statoru, D_{or} vnější průměr rotoru, h_{s2} výška části statorové drážky, d_t průměr rotorových tyčí, Q_R počet rotorových tyčí (v rámci stanovených mezí byly zakázány počty, které jsou považovány za nevhodné z hlediska parazitních momentů) a N_{zav} počet závitů statorového vinutí. V rámci ohodnocující, resp. penalizační, funkce je v tabulce zastoupen jmenovitý moment stroje M_n a teplota statorového vinutí ϑ_3 .

5.1.3 Výběr párů ke křížení (selekce)

Tato část se zabývá tzv. selekčním mechanismem, tedy způsobem, jakým jsou vybíráni jednotliví jedinci pro vytvoření páru s jinými jedinci za účelem reprodukce nových jedinců. Způsob tohoto výběru by měl, pokud možno co nejvěrněji, napodobovat mechanismus přirozeného výběru v živé přírodě. V podstatě jde o to, aby bylo zajištěno, že zdatnější jedinci budou mít větší šanci účastnit se reprodukčního procesu.

Nejčastěji používanou metodou v rámci GA je tzv. ruletová selekce, která je inspirována mechanismem klasické herní rulety. Modifikace této rulety spočívá v nerovnoměrném rozdělení velikostí jednotlivých výsečí, představujících pravděpodobnost výběru daného jedince, kdy nejzdatnějšímu jedinci je přiřazena největší výseč, méně zdatnému výseč menší atp. V praxi bývají velikosti jednotlivých výsečí stanoveny dvojím způsobem, a to podle pořadí jedince v populaci, která odpovídá jeho ohodnocení, nebo přímo podle velikosti jeho ohodnocení. Každý z těchto způsobů má své výhody i nevýhody. [11]

Výhodou ruletové selekce podle velikosti ohodnocení je především rychlost, s jakou lze dosáhnout optimálního řešení, naopak nevýhodou je poměrně značná míra rizika, že bude dosaženo pouze lokálního optima (riziko předčasné konvergence), což je dáno vyšším selektivním tlakem, který se negativně projevuje v případech, kdy je v populaci přítomen jeden výrazně zdatnější jedinec. Matematický zápis pravděpodobnosti výběru jedinců pro tento způsob selekce je následující [13]:

$$P_n = \frac{C_n}{\sum_n^{N_{sel}} C_n} \quad (5.1)$$

kde n je číselné označení jedince, C_n je velikost ohodnocení jedince a N_{sel} je počet jedinců populace, kteří byli vybráni, aby se podíleli na procesu křížení. Stanovení velikosti N_{sel} závisí na charakteru řešené problematiky. V některých případech je křížení umožněno celé populaci jedinců, jindy například pouze těm jedincům, kteří budou zachováni pro další generaci. V našem případě, kdy nově vzniklá populace jedinců plně nahrazuje populaci původní (s výjimkou dvou nejlepších

jedinců, kdy je aplikován tzv. „elitismus“) je toto číslo určeno jako $N_{pop} - N_{pen}$, kde N_{pen} je počet jedinců, kteří byli penalizováni za nedodržení předepsaných podmínek (viz. Kapitola 5.1). Zároveň je však předepsána podmínka, kdy v případě, že by číslo N_{pen} vycházelo příliš nízké, bude selekční proces vztažen na celou populaci, vyjma dvou nejhorších jedinců. [11,13]

Při ruletové selekci podle pořadí je naopak aplikován nižší selektivní tlak, díky čemuž je stále udržována rozmanitost párů, které se mezi sebou kříží, tudíž je zajištěna různorodost celé populace po více generací. Nevýhodou je však celkové zpomalení evolučního procesu, je proto nezbytné nastavit vyšší množství iterací (počet generací), po které bude proces křížení opakován. Toto je však nezbytná daň za snížení pravděpodobnosti, že bude algoritmus předčasně konvergovat. Naopak bude zvýšena šance k dosažení globálního optimálního řešení. Pravděpodobnost výběru jedinců v rámci tohoto případu lze popsat matematicky takto [13]:

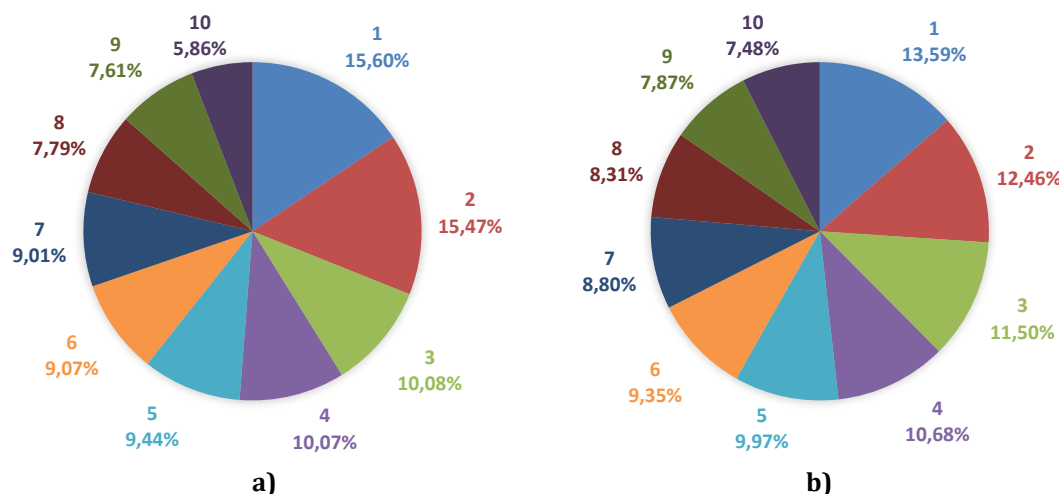
$$P_n = \frac{N_{sel} - n + 1}{\sum_{n=1}^{N_{sel}} n} \quad (5.2)$$

kde n je číselné označení jedince, tak jak byl umístěn v populaci na základě ohodnocování funkce, pro N_{sel} platí stejný význam jako pro rovnici (5.1). [11,13]

Také je vhodné zabezpečit, aby nedocházelo k situacím, kdy by stejný jedinec plnil funkci otce i matky. Důsledkem toho by pak došlo ke zcela zbytečnému křížení, při kterém by nevznikl nový jedinečný potomek, ale pouze přesná kopie rodiče.

V rámci použitého GA jsou využívány obě metody selekce, jejichž volba závisí na stavu populace. Primárně je využívána ruletová selekce dle hodnoty jedinců, pokud je však v populaci přítomen jeden výraznější jedinec, je využita selekce dle pořadí.

Příklad pravděpodobnosti výběru jedinců pro oba případy ruletové selekce, v rámci populace uvedené v Tab. 5.1, je naznačena výsečovými grafy na Obr. 5.3 a, b.



Obr. 5.3 Pravděpodobnost výběru v rámci ruletové selekce a) podle hodnoty b) podle pořadí

Jinou alternativou, která rovněž napodobuje mechanismus přirozeného výběru v živé přírodě je tzv. turnajový souboj, který se řídí pravidlem výběru „silnější vyhrává“. Tento způsob selekce spočívá v náhodné volbě menší skupiny jedinců (2 nebo 3) z celé populace, kteří mezi sebou soupeří o účast v reprodukčním procesu. Při použití této metody odpadá nutnost opakovaného třídění populace podle ohodnocení, což může být výhodné v případě, že pracujeme s rozsáhlými populacemi, kde by toto třídění mohlo výrazně zvyšovat časovou náročnost výpočtu. [13]

5.1.4 Křížení jedinců

Křížení je proces, při kterém probíhá výměna genetické informace jedinců, kteří byli vybráni na základě selekčního mechanismu. Tito jedinci byli vybráni za účelem vytvoření rodičovský páru a k následné reprodukci nového potomstva. Nejčastěji bývá uplatňováno takové křížení, při kterém každý z těchto uměle vytvořených páru stvoří dva nové potomky, z nichž každý je nositelem vlastností obou rodičů. V rámci GA je zvolený způsob křížení označován jako tzv. operátor křížení.

V případě, že pracujeme s reálnými čísly, je možné experimentovat s řadou takovýchto operátorů, z nichž nejzákladnější jsou [11]:

- Aritmetický operátor křížení – nový parametr jedince je určen aritmetickým průměrem rodičovských vlastností
- Geometrický operátor křížení – nový parametr je dán odmocninou součtu rodičovských vlastností
- Rozšiřující operátor křížení – rozdíl mezi velikostí hodnot, představujících vlastnosti obou rodičů je přičten k větší z nich a odečten od menší z nich apod.

Modifikací výše uvedených způsobů křížení je možné nalézt takový operátor, který bude nejvíce vyhovovat námi řešené problematice.

Jedním z takových operátorů, pomocí kterého je možné definovat nového potomka, je uveden v [13] a lze jej popsat takto:

$$p_{potomek,x} = \beta p_{matka,x} + (1 - \beta) p_{otec,x} \quad (5.3)$$

kde β je náhodné číslo z intervalu $\langle 0; 1 \rangle$, $p_{matka,x}$ je x-tý parametr matky a $p_{otec,x}$ představuje x-tý parametr otce. Jestliže náhodně zvolené číslo β bude ležet v intervalu $(0,5; 1)$, znamená to, že pro daný parametr převezme potomek větší množství genetické informace od matky, v případě že $\beta = 1$, pak potomek získá matčinu kompletní genetickou informaci. Stejně pravidlo platí i obráceně, tedy pokud β bude ležet v intervalu $\langle 0; 0,5 \rangle$ pak zdědí potomek více genetické informace po otci a při $\beta = 0$, převezme od něj informaci kompletně.

Pokud bude $\beta = 0,5$, pak bude nově vzniklý parametr potomka tvořen aritmetickým průměrem vlastností obou rodičů. [13]

Pro zvýšení výkonnosti GA je dobré zajistit, aby hodnota vlastnosti nově tvořeného potomka měla možnost přesáhnout hodnotu ohraničenou parametry obou rodičů. Opět je možno experimentovat z řadou matematických operátorů. Lze použít například následujících operátorů křížení:

$$p_{potomek,x} = \frac{p_{matka,x} + p_{otec,x}}{2} + \alpha(p_{matka,x} - p_{otec,x})\beta \quad (5.4)$$

$$p_{potomek,x} = \frac{p_{matka,x} + p_{otec,x}}{2} - \alpha(p_{matka,x} - p_{otec,x})\beta \quad (5.5)$$

kde parametr β je náhodné číslo z intervalu $\langle 0; 1 \rangle$ a α je číslo, které si zvolíme. Za předpokladu, že bude platit $p_{matka,x} > p_{otec,x}$ a $\alpha = 1$, pak v případě, že $\beta > 0,5$, bude v rámci vztahu (5.4) získán jedinec s vyšší hodnotou parametru, než je nejvyšší hodnota obou rodičů (dojde k překročení horní hranice), v případě (5.5) bude jeho hodnota naopak nižší, než je nejnižší hodnota obou rodičů (překročení spodní hranice). Parametrem α lze ovlivnit pravděpodobnost, se kterou bude tato hranice překročena (volbou $\alpha < 1$ bude tato pravděpodobnost snížena, volbou $\alpha > 1$ bude pravděpodobnost naopak zvýšena).

Genetický algoritmus, který byl pro tuto práci sestaven využívá všech výše zmíněných operátorů křížení, jejichž výběr je proveden na základě losování náhodného čísla, přičemž jsou více preferovány operátory (5.4) a (5.5).

5.1.5 Mutace

Proces mutace je posledním krokem genetického algoritmu, kterým je možné ovlivnit výslednou podobu nově vzniklých jedinců. V rámci GA je to další z prvků, který imituje děje, probíhající v živé přírodě, kdy každá předávaná genetická informace může být změněna vlivem mutace. V rámci algoritmu jde v podstatě o náhodný výběr jedinců, přesněji jejich parametrů, které budou po skončení křížícího procesu modifikovány.

Vhodným provedením operátoru mutace můžeme dosáhnout navýšení výkonnosti celého algoritmu. Opět je třeba uplatnit takový mechanismu, který zvýší pravděpodobnost, že bude dosaženo globálního optima, a naopak co nejvíce sníží riziko, že optimum bude nalezeno pouze v rámci lokální oblasti. Jedním z těchto mechanismů, který byl popsán v podkapitole 5.1.3, je selekce. Druhou možností je právě použití operátoru mutace, díky kterému dosáhneme změny určitého parametru kteréhokoliv z jedinců, což nám umožní zkoumat jiné oblasti možných řešení problému. [13]

Výběr jedinců a parametrů, kteří budou mutováni, je řešen zcela náhodně napříč celou populací, pouze s výjimkou dvou nejlepších jedinců, které je třeba zachovat, aby nebyla narušena jejich genetická informace.

Základní formy mutačních operátorů jsou tyto [11]:

- Mutace náhodným výběrem – mutovaný parametr je přehodnocen novým náhodně zvoleným číslem (samozřejmě ohraničeným danými mezemi)
- Mutace aditivní změnou parametru – k mutovanému parametru je přičteno náhodně generované číslo
- Mutace multiplikativní změnou parametru – mutovaný parametr je násoben náhodně generovaným číslem

Množství jedinců, resp. parametrů, na které má být operátor mutace aplikován opět závisí na charakteru úlohy. V literatuře [13] je používán rozsah mutace, který odpovídá 20 % celé populace, což pro náš případ znamená:

$$N_{mut} = (N_{pop} - N_{elit}) \cdot N_{par} \cdot 0,2 = (20 - 2) \cdot 8 \cdot 0,2 \cong 28 \text{ mutací} \quad (5.6)$$

kde N_{elit} značí počet původních jedinců, kteří jsou zachováni pro další generaci. [13]

Pro genetický algoritmus dané aplikace bylo dále experimentováno s tzv. poměrnou změnou rozsahu mutace, při které je prováděna kontrola, zda je v populaci dostatečná rozmanitost jedinců. V případě, že je zjištěn mezi jednotlivými jedinci tak malý rozdíl, který by vedl ke značnému snížení reprodukce nových, unikátních jedinců, dojde automaticky k navýšení tohoto rozsahu.

5.1.6 Ukončovací podmínka

Jak je vidno z obrázku 5.1 b, proces, která se skládá z ohodnocení jedinců, selekce, křížení a mutace, se v tomto pořadí opakuje do té doby, než je splněna ukončovací podmínka. Genetický algoritmus může být ukončen typicky dvojím způsobem, jednak v případě, že bude nalezeno řešení splňující určitou podmínku (např. délka stroje menší než 100 mm), nebo v okamžiku kdy dojde k překročení předem stanoveného maximálního počtu iterací (generací) a to bez ohledu na hodnocení nejlepšího jedince v aktuální populaci.

Je tedy třeba odhadnout takové množství generací (odpovídající počtu opakování „rozmnožovacího“ procesu), které bude dostatečně pro získání nejvhodnějšího řešení. V praxi to znamená, že ke konci algoritmu by se hodnota nejvhodnějšího řešení v rámci celé populace již neměla příliš měnit, spíše by měla zůstat konstantní.

5.2 Shrnutí hlavních znaků a výhod genetického algoritmu

Hlavní znaky genetického algoritmu [11]:

- Pracuje s náhodně vytvořenou populací jedinců
- Každý z těchto jedinců v sobě zahrnuje jedno eventuální řešení daného problému (tedy seznam hodnot jednotlivých vstupních proměnných)
- Všichni tito jedinci jsou ohodnoceni na základě zvolené ohodnocující funkce
- Výběr párů jedinců, vhodných k následné reprodukci, je realizován na základě jejich předchozího ohodnocení
- Nově vzniklí jedinci nesou genetickou informaci, získanou vzájemnou kombinací vlastností obou jedinců, tvořících pár a představují tak nová potenciální řešení problému

Hlavní výhody genetického algoritmu [11,13]:

- Pracuje se spojitými i diskrétními proměnnými
- Univerzálnost a poměrně snadná aplikovatelnost v různých oblastech
- Poměrně rychlé nalezení přijatelného řešení
- Počítá s velkým množstvím proměnných
- Využívá celou populaci proměnných z prohledávaného prostoru, nikoliv pouze jedno počáteční řešení
- Výstupem je seznam přijatelných (nebo optimálních) řešení, nejen jednoho

Tyto a další výhody dělají z této optimalizační metody silný nástroj pro nalezení přijatelného řešení, a to v rámci rozumného časového intervalu, při kterém lze zpracovávat velké množství proměnných, majících na toto řešení vliv.

6 PŘÍPADOVÁ STUDIE OPTIMÁLNÍCH ŘEŠENÍ NAVRHOVANÉHO STROJE

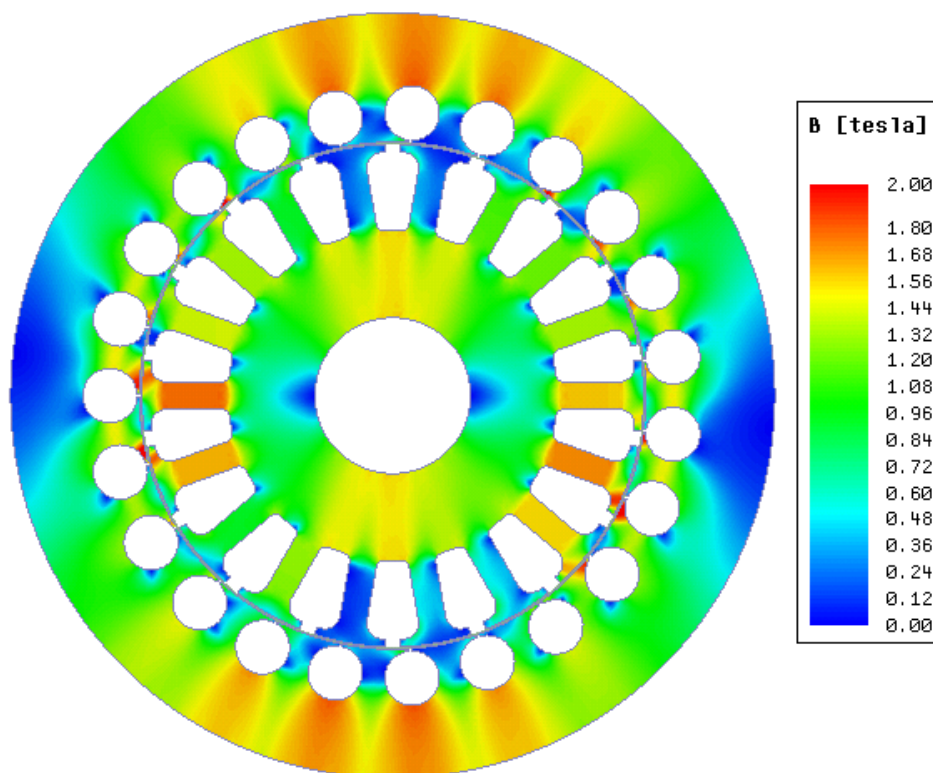
Jelikož není dosud známo přesné konstrukční uspořádání lopatek čerpadla a materiály ze kterých by se mělo vyrábět, bude v rámci poslední kapitoly této práce provedeno srovnání různých variant stroje. Součástí tohoto výzkumu bude porovnání elektrických, tepelných a rozměrových parametrů stroje dle jeho provedení. První studie bude vypracována z hlediska použitých materiálů. V rámci druhé studie pak bude zkoumán vliv natočení rotorových tyčí a uzavření rotorových drážek na zvlnění momentu stroje.

6.1 Studie z hlediska použitých materiálů

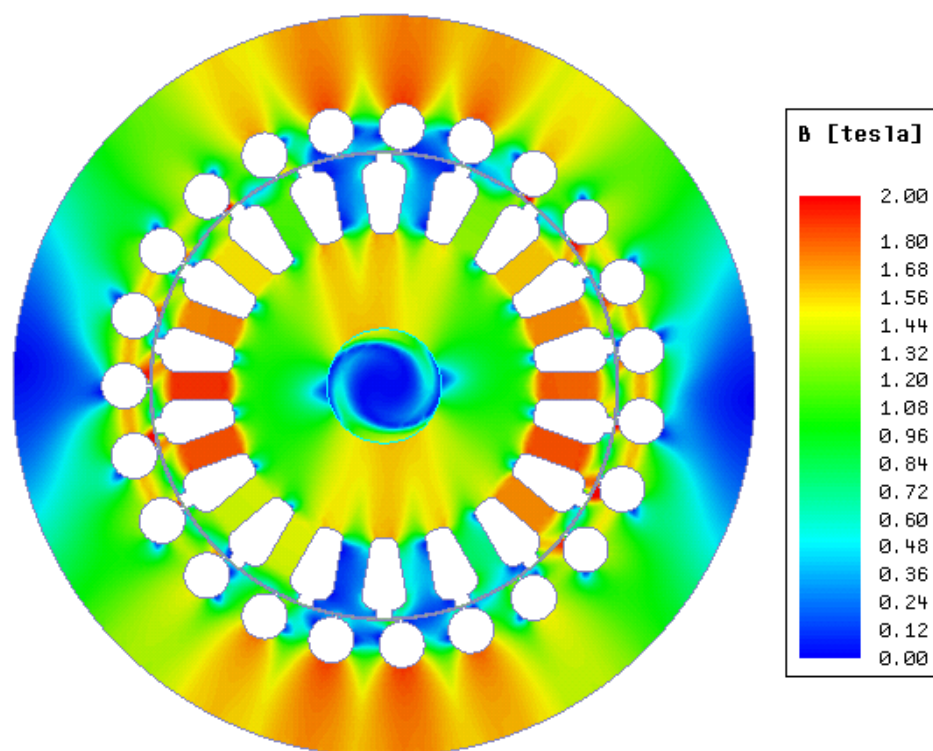
Z Tab. 4.2 je možné vyčíst hodnoty součinitelů tepelných vodivostí materiálů, které patří mezi vstupní parametry tepelného výpočtu stroje, pro každý ze zkoumaných případů tak byla provedena úprava tepelného výpočtu, sloužící jako penalizační funkce genetického algoritmu. Jelikož se předpokládá, že stroj s horším odvodem tepla bude mít zřejmě větší rozměry než stroj, u kterého je předpokládán lepší odvod tepla, je současně prováděna korekce stanovených mezí v rámci genetického algoritmu.

Prvním vzorkem studie je stroj, u kterého je uvažována hřídel i kostra z plastových materiálů, což je varianta s nejhorším uvažovaným odvodem tepla. Jelikož se předpokládá, že z hlediska zkoumání vhodnosti použití čerpadla tohoto typu a z hlediska ověření správnosti navrhovaného řešení, bude stroj zhotoven právě z těchto materiálů, je tento vzorek považován za referenční. Upřednostnění této varianty je dáno zejména jednoduchostí výroby jednotlivých dílů, které by měly být vytištěny na 3D tiskárně. Druhým vzorkem je stroj, u kterého je předpokládán kvalitnější odvod tepla, jelikož uvažujeme hřídel včetně konzole z oceli, tudíž se předpokládá lepší odvod tepla ze statoru. U posledního vzorku je uvažována výroba kostry (včetně lopatek) i hřídele z kovových materiálů, půjde tedy o stroj s nejkvalitnějším odvodem tepla, je tedy pravděpodobné, že u tohoto stroje bude možné dosáhnout nejmenších rozměrů ze všech zkoumaných vzorků. Konkrétně je počítáno s hliníkovou kostrou a hřídelovou konzolí z oceli.

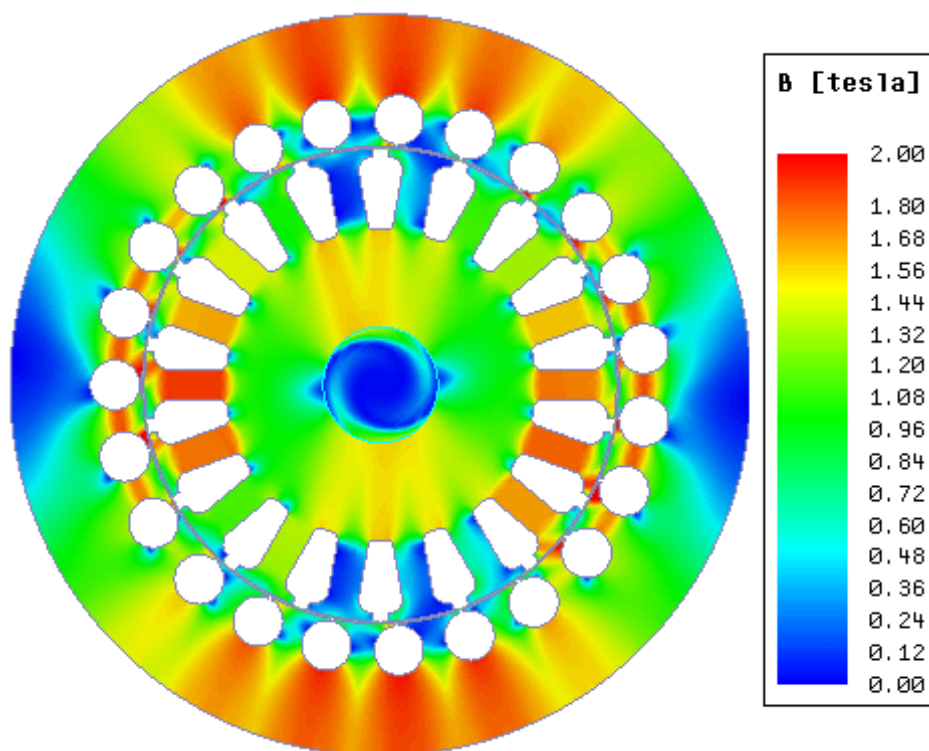
Elektromagnetická a tepelná analýza všech uvedených vzorků byla provedena v souladu s postupem, uvedeným v předchozích kapitolách této práce. Nejprve byly, pomocí GA, ve spolupráci s programem RMXprt, stanoveny optimální rozměry stroje. Pro tyto rozměry byla následně provedena simulace metodou konečných prvků v programu Maxwell, ze které byly následně vyčteny přesnější hodnoty zkoumaných parametrů.



Obr. 6.1 Rozložení magnetické indukce v řezu stroje s nejhorším odvodem tepla (vzorek 1)



Obr. 6.2 Rozložení magnetické indukce v řezu stroje s lepším odvodem tepla (vzorek 2)



Obr. 6.3 Rozložení magnetické indukce v řezu stroje s nejlepším odvodem tepla (vzorek 3)

Z důvodu chyby ve výpočtu programu RMxpertu, popsané v kapitole 2.3, bylo nutné provést úpravu nalezeného optimálního řešení provedením většího množství simulací u každého vzorku, při kterých byly postupně korigovány parametry stroje (včetně jeho vnějších rozměrů) tak, aby výsledné řešení splňovalo podmínky maximálního dovoleného oteplení statorového vinutí a minimálního požadovaného výkonu.

Rozložení magnetické indukce pro jednotlivé vzorky je vyobrazeno na Obr. 6.1-6.3, hodnoty magnetické indukce v jednotlivých částech jsou pak zaznamenány v Tab. 6.1. Podle zjištěných ztrát bylo následně provedeno nové ověření tepelných poměrů ve stroji. Zjištěné parametry jednotlivých zkoumaných vzorků, a jejich srovnání, je provedeno v Tab. 6.2.

Tab. 6.1 Hodnoty magnetické indukce jednotlivých vzorků

	B_{zs}	B_{zr}	B_{js}	B_{jr}	
	[T]	[T]	[T]	[T]	
Vzorek 1	1,77	1,49	1,52	1,75	Nejhorší tepelná vodivost
Vzorek 2	1,90	1,63	1,62	1,80	Lepší tepelná vodivost
Vzorek 3	1,87	1,80	1,55	1,88	Nejlepší tepelná vodivost

Z hodnot magnetické indukce uvedených v Tab. 6.1 je zřejmá vyšší míra sycení u vzorku 2 a 3, kde dosahuje nejvyšších hodnot, zejména pak ve statorových zubech, což je způsobeno vlivem zmenšování délky statorového a rotorového svazku. Pro udržení velikost magnetické indukce v přijatelných mezích, bylo u těchto vzorků provedeno zvětšení šířky statorových zubů.

Tab. 6.2 Srovnávací tabulka parametrů jednotlivých vzorků

		Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3
Elektrické parametry				
I_{1n}	[A]	4,064	4,513	4,642
M_n	[Nm]	3,99	4,0	3,95
P_1	[W]	2552,3	2578,9	2571,8
P_2	[W]	2089,2	2094,4	2068,2
S_1	[VA]	2804,2	3114,0	3203,0
ΔP_{j1}	[W]	155,7	175,7	194,6
ΔP_{j2}	[W]	67,6	53,7	73,5
ΔP_{Fe1}	[W]	27,8	21,2	22,5
ΔP_{Fe2}	[W]	9,4	7,9	8,9
ΔP_h	[W]	-	5,5	2,9
$\cos \varphi$	[-]	0,9102	0,8282	0,8029
η_n	[%]	81,85	81,21	80,42
Teplota statorového vinutí				
u_3	[°C]	177,8	168,3	129,6
Dispozice stroje				
D_{oR}	[mm]	98,2	97,5	96,5
D_{iR}	[mm]	64,8	61,3	61,8
D_{oS}	[mm]	64,5	61,0	61,5
D_{iS}	[mm]	20,0	15,0	15,0
h_{s2}	[mm]	7,1	6,5	6,7
b_{zs}	[mm]	3,5	3,8	4,0
d_t	[mm]	7,0	6,0	6,5
d_{Cu}	[mm]	0,8	0,75	0,71
l_{Fe}	[mm]	126	110	100
Q_R	[-]	23	23	23
N_{zav}	[-]	50	45	50

Mimo hodnoty, které byly zjištěny v souladu s postupem uvedeným v kapitole 2 byly dále zjištěny hodnoty příkonu P_1 a zdánlivého příkonu S_1 . Příkon P_1 byl zjištěn jako střední hodnota ze součtu okamžitých příkonů jednotlivých fází stroje v ustáleném stavu, zdánlivý příkon pak ze znalosti vstupní efektivní hodnoty proudu I_1 a fázového napětí. Podílem těchto hodnot pak byla zjištěna velikost účinníku $\cos \varphi$. Dále byla vypočtena účinnost stroje podílem výkonu a příkonu stroje.

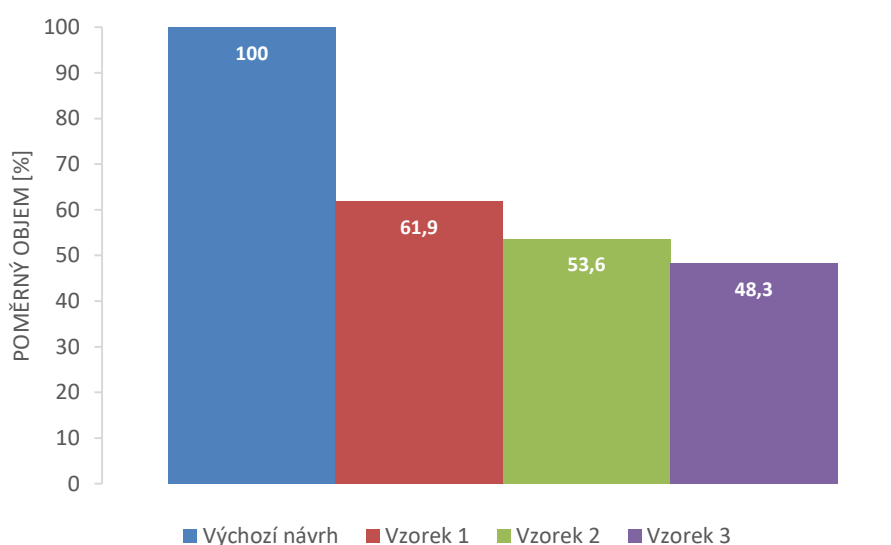
Po přezkoumání vypočítaných hodnot můžeme pozorovat viditelné snižování účinnosti i účinnosti stroje u vzorků 1 a 2, což je dáno menší délkou statorového a rotorového svazku.

Vzorky 2 a 3 mají hřídel vyrobenou z oceli, proto je pro ně v rámci simulace provedena také analýza ztrát, které v této hřídeli, vlivem blízkostí magnetického pole statoru, vznikají. Velikost těchto ztrát souvisí s velikostí syčení statorového jha, které je největší u vzorku 2, tudíž i ztráty v hřídeli jsou u tohoto vzorku nejvyšší (v tabulce označeno jako ΔP_h).

V souvislosti s požadavkem na snížení rozměrů stroje bylo provedeno také zmenšení průměru statorových i rotorových plechů. Následkem toho však byla, mimo jiné, snížena také plocha statorových drážek. Pro vzorky 2 a 3 je průměr statorových plechů nejmenší. Aby nebyla překročena stanovená hodnota činitele plnění drážky, bylo u těchto variant přistoupeno ke zmenšení průměru vodičů vinutí.

U vzorku 3 je možné si povšimnout výraznější rezervy v rámci teploty statorového vinutí. Teoreticky bychom tedy mohli provést další zmenšení svazku, čímž by bylo dosaženo ještě menších rozměrů stroje. Vlivem dalšího zmenšování by však nejspíše docházelo již k výraznému přesycování magnetického obvodu.

Porovnání poměrného snížení objemu jednotlivých vzorků, vzhledem k výchozímu návrhu stroje, je znázorněno graficky na Obr. 6.4. Z uvedeného sloupcového grafu je zřejmé, že v rámci referenčního vzorku 1, určeného k výrobě, bylo dosaženo snížení objemu navrhovaného stroje téměř o 40 %. V případě, že by se čerpadlo tohoto typu prakticky osvědčilo a v další konstrukci by bylo využito materiálů s lepší tepelnou vodivostí (vzorek 3), mohl by být tento objem teoreticky snížen ještě o dalších 10-15 %.



Obr. 6.4 Poměrný objem stroje jednotlivých vzorků vztahený k výchozímu návrhu

6.2 Studie vlivu natočení rotorových tyčí a použití otevřených/uzavřených drážek referenčního vzorku

Ve druhé studii je zkoumán vliv natočení rotorových tyčí a uzavření drážek na zvlnění momentové charakteristiky. Jelikož program RMxpert není schopen tyto vlivy korektně zohlednit, bude tato analýza provedena výhradně pomocí MKP výpočtů v programu Maxwell. Tato studie je prováděna pouze v rámci referenčního modelu stroje, tedy pro vzorek 1 z kapitoly 6.1.

V základním provedení je rotorová část tvořena plechy s otevřenými drážkami a nasunutými nenatočenými tyčemi. Vlivem otevření drážek dochází ke značným pulsacím momentu stroje o vysoké frekvenci (v našem případě asi 5 kHz). Nenatočení rotorových tyčí pak souvisí s velikostí amplitudy těchto pulsací, kdy rozkmit momentu v rámci tohoto provedení dosahuje hodnoty až 0,8 Nm.

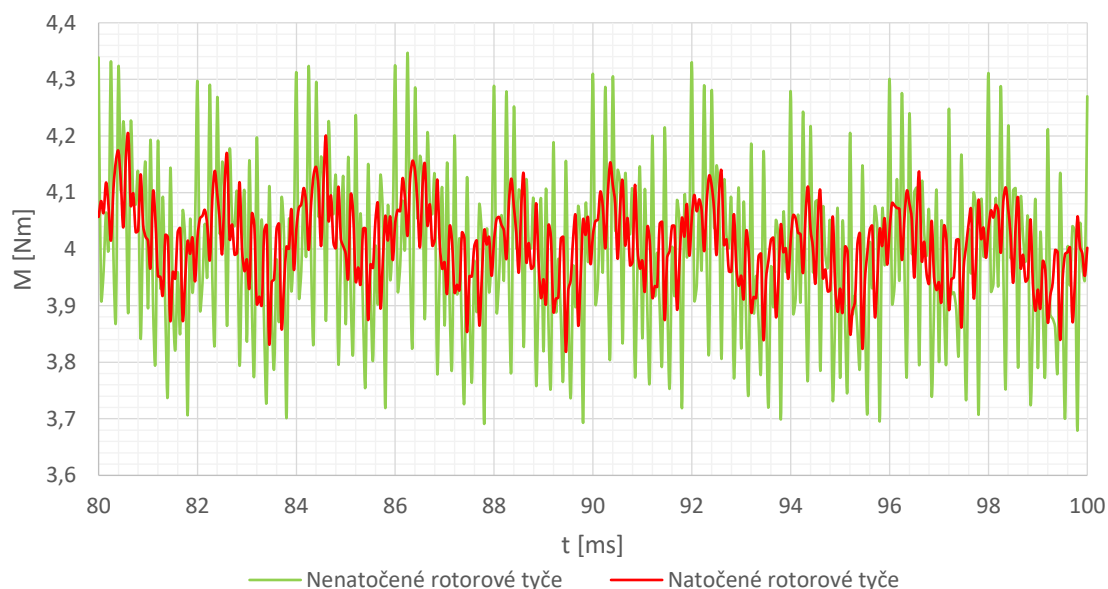
Pro zmírnění tohoto škodlivého jevu byly aplikovány tři modifikace. První úprava spočívala v použití plechů s uzavřenými drážkami, ve druhé úpravě pak bylo provedeno natočení rotorových tyčí o jednu drážkovou rozteč. Třetí modifikace je kombinací první a druhé úpravy. Efekt těchto úprav v porovnání se základním provedením je demonstrován na Obr. 6.5-6.7.

Na Obr. 6.5 je znázorněn vliv použití uzavřených rotorových drážek. Je zřejmé, že aplikací této úpravy by došlo k výraznému zmírnění frekvence pulsací momentu.



Obr. 6.5 Časový průběh momentu v ustáleném stavu při použití otevřené a uzavřené rotorové drážky s nenatočenými tyčemi

Vliv natočení rotorových tyčí o jednu drážkovou rozteč je znázorněn na Obr. 6.6. Touto změnou by došlo k potlačení části škodlivých harmonických složek, ovlivňujících charakter průběhu momentu. Zároveň by došlo také ke snížení amplitudy pulsací na 0,3 Nm, přičemž průměrná hodnota momentu by byla navýšena na 4,01 Nm.



Obr. 6.6 Časový průběh momentu v ustáleném stavu při použití otevřených rotorových drážek s natočenými a nenatočenými tyčemi

Obr. 6.7 pak zachycuje změnu zvlnění momentu při kombinaci první a druhé úpravy v rotorové části stroje. Touto modifikací by došlo k největšímu potlačení škodlivých harmonických, majících vliv na frekvenci pulsací momentu.



Obr. 6.7 Časový průběh momentu v ustáleném stavu při použití otevřených drážek s nenatočenými tyčemi a uzavřených rotorových drážek s natočenými tyčemi

Změna elektrických parametrů stroje v rámci jednotlivých modifikací je zaznamenána v Tab. 6.3. Z této tabulky je zřejmé mírné zlepšení účinnosti u všech zkoumaných vzorků 1.2-1.4.

Tab. 6.3 Srovnání elektrických parametrů v rámci jednotlivých modifikací

		Vzorek 1	Vzorek 1.2	Vzorek 1.3	Vzorek 1.4
Elektrické parametry					
I_{1n}	[A]	4,064	4,058	4,072	4,065
M_n	[Nm]	3,99	4,00	4,01	4,00
P_1	[W]	2552,3	2526,9	2557,6	2532,2
P_2	[W]	2089,2	2094,4	2099,6	2094,4
S_1	[VA]	2804,2	2800,0	2809,7	2804,9
$\cos \varphi_n$	[-]	0,9102	0,9025	0,9103	0,9028
η_n	[%]	81,85	82,88	82,09	82,71

Pozn.: Vzorek 1.2 představuje rotor s uzavřenými drážkami, Vzorek 1.3 pak s natočenými tyčemi a Vzorek 1.4 pak stroj s uzavřenými drážkami a natočenými tyčemi.

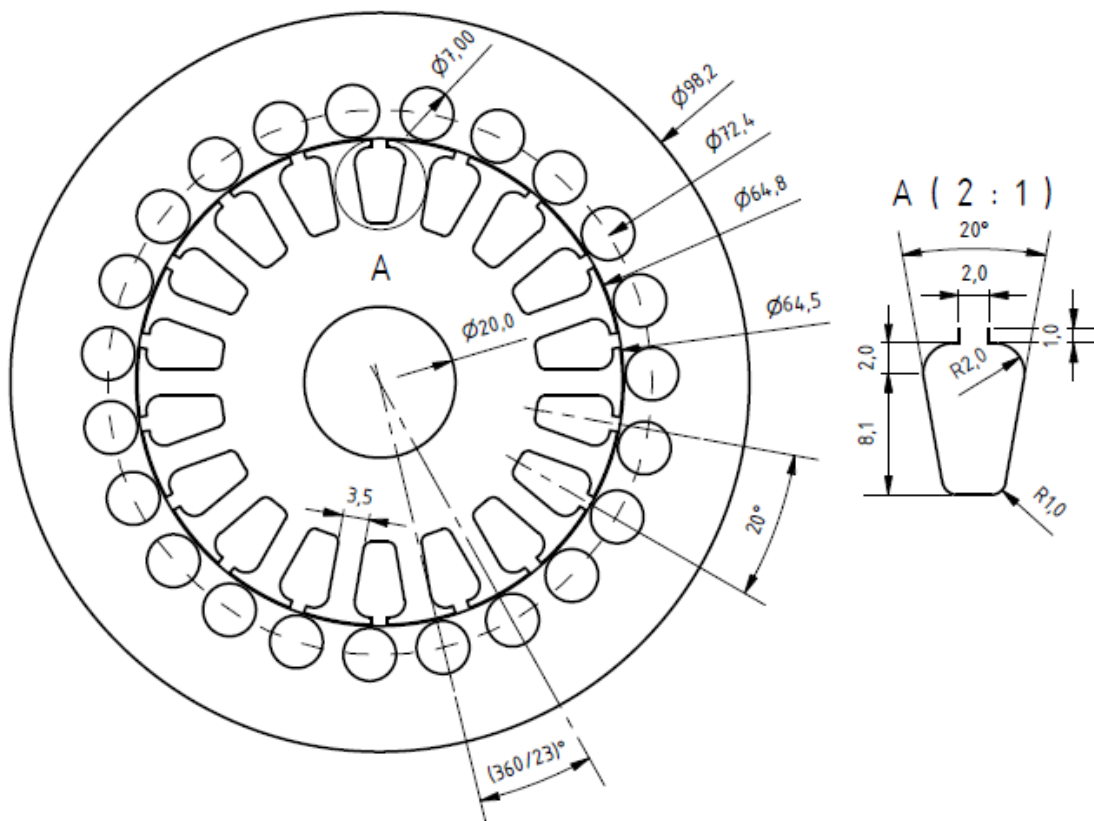
Natočení měděných tyčí, v rámci pájené rotorové klece je z technologického hlediska velmi náročné. Použití uzavřených drážek však nepředstavuje pro výrobu závažný problém. Za účelem zmírnění pulsací momentu tak bude v rámci výsledného řešení tato modifikace využita.

6.3 Parametry výsledného řešení stroje

Uvažujeme souměrné rozložení statorového vinutí se třemi drážkami na pól a fázi s plným krokem cívk.

Tab. 6.4 Parametry výsledného řešení stroje

Veličina	Hodnota	Jednotka	Popis
2p	2	[-]	Počet pólů stroje
D _{oR}	98,2	[mm]	Vnější průměr rotoru
D _{iR}	64,8	[mm]	Vnitřní průměr rotoru
Q _R	23	[-]	Počet tyčí rotorové klece
d _t	7	[mm]	Průměr tyče rotorové klece
h _{r0}	0,4	[mm]	Výška otevření rotorové drážky
b _{r0}	0,3	[mm]	Šířka otevření rotorové drážky
a _k	11,2	[mm]	Výška kruhů rotoru
b _k	17,6	[mm]	Šířka kruhů rotoru
D _{oS}	64,5	[mm]	Vnější průměr statoru
D _{iS}	20	[mm]	Vnitřní průměr statoru
Q _S	18	[-]	Počet statorových drážek
h _{s0}	1	[mm]	Výška otevření statorové drážky
h _{s1}	2	[mm]	Výška statorové drážky 1
h _{s2}	7,1	[mm]	Výška statorové drážky 2
r _s	1	[mm]	Poloměr zaoblení dna statorové drážky
b _{s0}	2	[mm]	Šířka otevření statorové drážky
b _{zs}	3,5	[mm]	Šířka zubu statoru
l _{Fe}	126	[mm]	Délka statorového a rotorového svazku
k _{Fe}	0,94	[-]	Činitel plnění železa
k _{pCu}	0,75	[-]	Činitel plnění statorové drážky
d _{Cu}	0,8	[mm]	Průměr vodiče statorového vinutí
N _{zav}	50	[-]	Počet závitů



Obr. 6.8 Geometrie výsledného řešení stroje

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byl návrh asynchronního motoru s vnějším rotorem pro pohon čerpadla s výkonem 2 kW a požadavkem na minimalizaci celkových rozměrů.

Nejprve bylo nutné ověřit existující návrh motoru z hlediska požadovaných výkonových parametrů a provést výpočet teplot v jeho jednotlivých částech a ověřit, zda nedošlo k překročení maximální dovolené teploty vinutí, dané typem použité izolace. Přitom už zpočátku bylo zřejmé, že umístění statoru ve vnitřní části stroje bude představovat problém z hlediska odvodu tepla ze statorového vinutí, které bývá u malých strojů zpravidla největším zdrojem ztrát. V nejhorším případě mohou Jouleovy ztráty statorového vinutí tvořit i polovinu celkových ztrát. Stejně tak i ztráty v železe vznikají především v rámci magnetického obvodu statoru. Navíc byl vznesen požadavek, že mechanické součásti prvního vyrobeného prototypu mají být nejspíše vyrobeny z plastu na 3D tiskárně, což nepochybně povede k dalšímu zhoršení odvodu tepla z elektromagnetické části stroje do okolního chladiva.

Elektromagnetický model stroje byl v programu RMxpert upraven tak, aby umožňoval provedení optimalizace. Následně byl spuštěn analytický výpočet programu, jehož výsledky byly poté ověřeny přesnější simulací MKP v programu Maxwell. Postup výpočtů a jejich výsledky jsou uvedeny v kapitole 2.

Pro výpočet teplot pak byla vytvořena tepelná síť sestavená z tepelných vodivostí, jejichž velikost je dána geometrickým uspořádáním a materiálovými vlastnostmi jednotlivých částí stroje, a ze zdrojů tepelného toku, resp. ztrát vyčíslených z předchozích simulací. Výpočet této sítě, jejímž výstupem jsou hledané teploty stroje, byl naprogramován v prostředí Matlab. Z výstupu programu byla zjištěna velikost teploty statorového vinutí 145,09 °C, bylo tedy zřejmé, že v případě použití izolace vinutí třídy H, u které je předepsána maximální dovolená teplota 180 °C, lze přistoupit k optimalizačnímu procesu zmenšování rozměrů stroje. Navíc při výpočtu jednotlivých vodivostí byly uvažovány vždy nižší hodnoty z rozsahu součinitelů tepelných vodivostí použitých materiálu, čímž je zaručena jistá bezpečnost navrhovaného řešení z hlediska tepelného namáhání. Sestavení tepelné sítě, a její řešení je uvedeno v kapitole 4.

V kapitole 5 je popsána optimalizace rozměrů stroje, která je řešena pomocí genetického algoritmu, naprogramovaného v prostředí Matlab. Genetický algoritmus slouží k nalezení optimálních rozměrů stroje, přičemž spolupracuje s programem RMxpert, za účelem elektromagnetického ověření výpočtu a také s programem pro ověření teplot statorového vinutí. Bohužel bylo zjištěno, že ztráty zjištěné pomocí MKP simulace vycházejí ve srovnání s analytickým výpočtem značně vyšší, zatímco velikost momentu, potažmo výkonu stroje vycházejí naopak nižší, navíc s nepředvídatelnou závislostí na podobě stroje. To je způsobeno typem

stroje, který RMxpert, jak bylo zjištěno, neumí správně vypočítat. Nalezené optimální řešení tedy bylo nutné upravit tak, aby splnilo předepsané podmínky při výkonu a ztrátách zjištěných programem Maxwell.

Poslední kapitola se pak zabývá studií možných řešení stroje z hlediska použití materiálů jednotlivých mechanických součástí o různé tepelné vodivosti. Na závěr byl zkoumán vliv natočení rotorových tyčí a uzavření rotorových drážek na zvlnění momentu. Následkem tohoto výzkumu byla provedena konečná úprava návrhu stroje, kdy místo otevřených rotorových drážek bude použito drážek uzavřených, čímž bude dosaženo snížení pulsací momentu, souvisejících s přítomností vyšších harmonických způsobených konečným drážkováním statoru a rotoru.

Výstupem této práce je optimalizovaný návrh stroje, u kterého došlo v porovnání s výchozím návrhem stroje, ke snížení objemu o 40 %. Provedená studie pak poukazuje na možnost snížení tohoto objemu o 50 až 55 % v případě použití materiálů mechanických součástí s lepší tepelnou vodivostí. Součástí tohoto návrhu je zakótovaný náčrtek statorového a rotorového plechu určeného pro výrobu.

Literatura

- [1] BOLDEA, I. a S. A. NASAR. *The induction machine handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2002. ISBN 0849300045.
- [2] KOPYLOV, Igor Petrovič. *Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [3] Ansoft - ANSYS, "www.ansys.com," Ansoft [Online]. [cit. 2018-21-1]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/Products/Electronics/ANSYS-RMxprt>
- [4] HYNŠT, Radomil a Drahomíra NEČASOVÁ. *Výpočet chlazení asynchronního motoru nakrátko, provedení IP44 s žebrovanou kostrou, bez vnitřního oběhu vzduchu*. Brno: Výzkumný ústav elektrických strojů, 1969.
- [5] VLACH, Radek. *Tepelné procesy v mechatronických soustavách*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-3976-4.
- [6] TOMAN, Marek. *Vázané modelování asynchronního motoru metodou fyzikálního modelování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 63 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.
- [7] Nabla – Tepelná kapacita, měrná tepelná kapacita, "www.nabla.cz," [Online]. [cit.2017-12-12]. Dostupné z: <http://www.nabla.cz/obsah/fyzika/molekulova-fyzika-a-termika/tepelna-kapacita-merna-tepelna-kapacita.php>
- [8] CIGÁNEK, Ladislav a Miroslav BAUER. *Elektrické stroje a přístroje: učební text pro průmyslové školy elektrotechnické - čtyřleté*. 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957.
- [9] Katalog M330-35A - Cogent Power, "www.cogent-power.com," Cogent [Online]. [cit. 2017-15-12]. Dostupné z: <https://cogent-power.com/cms-data/downloads/m330-35a.pdf>
- [10] Automatizace.hw.cz - Principy průmyslových čerpadel – 4.díl - odstředivá čerpadla, "www.automatizace.hw.cz," [Online]. [cit. 2018-16-1]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/principy-prumyslovych-cerpadel-4dil-odstrediva-cerpadla>
- [11] HYNEK, Josef. *Genetické algoritmy a genetické programování*. Praha: Grada, 2008. Průvodce (Grada). ISBN 978-80-247-2695-3.
- [12] SLÁMA, Lubomír. *Genetický algoritmus a jeho využití pro řešení identifikačních a optimalizačních úloh inženýrské mechaniky*. Brno: Vysoké učení technické, 2000. Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně. ISBN 80-214-1773-0.
- [13] HAUPT, Randy L. a S. E. HAUPT. *Practical genetic algorithms*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: John Wiley, c2004. ISBN 0-471-45565-2.

- [14] GREGOR, Tomáš. *Vázané modelování asynchronního motoru metodou konečných prvků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 61s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.
- [15] ÇENGEL, Yunus A. a Afshin J. GHAJAR. *Heat and mass transfer: fundamentals & applications*. Fifth edition. New York, NY: McGraw Hill Education, 2015. ISBN 978-0-07-339818-1.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

GA		Genetický algoritmus
MKP		Metoda konečných prvků
a_k	[m]	Výška rotorového kruhu
a_{ξ}	[m]	Střední tloušťka štítu
B_{zs}	[T]	Magnetická indukce v zubech statoru
B_{zr}	[T]	Magnetická indukce v zubech rotoru
B_{js}	[T]	Magnetická indukce ve jhu statoru
B_{jr}	[T]	Magnetická indukce ve jhu rotoru
b_i	[m]	Tloušťka drážkové izolace
b_k	[m]	Šířka rotorového kruhu
b_{r0}	[m]	Šířka otevření rotorové drážky
b_{s0}	[m]	Šířka otevření statorové drážky
b_{zs}	[m]	Šířka zubu statoru
C	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Měrné teplo
$\cos \varphi$	[-]	Jmenovitý účinník stroje
D_{oR}	[m]	Vnější průměr rotoru
D_{oK}	[m]	Vnější průměr kostry
D_{iR}	[m]	Vnitřní průměr rotoru
$D_{o\delta}$	[m]	Vnější průměr ložiskového štítu
$D_{i\delta}$	[m]	Vnitřní průměr ložiskového štítu
D_{oS}	[m]	Vnější průměr statoru
D_{iS}	[m]	Vnitřní průměr statoru
d_{Cu}	[m]	Průměr vodiče statorového vinutí
d_t	[m]	Průměr tyče rotorové klece
G_{ϑ}	[W·K ⁻¹]	Tepelná vodivost
$g_{\delta S}$	[W·K ⁻¹]	Tepelná vodivost vzduchové mezery ze strany statoru
$g_{\delta R}$	[W·K ⁻¹]	Tepelná vodivost vzduchové mezery ze strany rotoru
H_S	[m]	Celková výška statorové drážky
H_R	[m]	Celková výška rotorové drážky
h_{s0}	[m]	Výška otevření statorové drážky
h_{s1}	[m]	Výška statorové drážky 1
h_{s2}	[m]	Výška statorové drážky 2
h_{jS}	[m]	Výška statorového jha
h_{jR}	[m]	Výška rotorového jha
h_{r0}	[m]	Výška otevření rotorové drážky
I_a	[A]	Efektivní hodnota proudu ve fázi a
I_b	[A]	Efektivní hodnota proudu ve fázi b
I_c	[A]	Efektivní hodnota proudu ve fázi c
I_{1n}	[A]	Jmenovitý vstupní efektivní proud stroje
$I_{k_{ef}}$	[A]	Efektivní hodnota proudu v kruhu rotoru
$I_{k_{max}}$	[A]	Maximální hodnota proudu v kruhu rotoru
$I_{t_{ef}}$	[A]	Efektivní hodnota proudu v rotorových tyčích
$I_{t_{stř}}$	[A]	Střední hodnota proudu v rotorových tyčích
$k_{\beta S}$	[K·m ⁻¹ ·W ⁻¹]	Součinitel tepelného odporu mezi zubem a jhem statoru

$k_{\beta S}$	[K·m ⁻¹ ·W ⁻¹]	Součinitel tepelného odporu mezi zubem a jhem rotoru
k_{vS}	[K·m ⁻² ·W ⁻¹]	Měrný tepelný odpor ekvivalentní vrstvy vzduchu
k_{Fe}	[-]	Činitel plnění železa
l_s	[m]	Délka válcové části štítu
$l_{s celk}$	[m]	Délka štítu
l_t	[m]	Délka rotorové tyče
l_k	[m]	Délka kostry
l_{Fe}	[m]	Délka statorového a rotorového svazku
$M_{n, pož}$	[Nm]	Požadovaný jmenovitý moment stroje
M_n	[Nm]	Jmenovitý moment stroje
Nu	[-]	Nusseltovo číslo
N_{zav}	[-]	Počet závitů
n_n	[min ⁻¹]	Jmenovité otáčky stroje
P_n	[W]	Jmenovitý výkon stroje
P	[W]	Tepelný tok
P_1	[W]	Příkon
P_2	[W]	Výkon
S_1	[VA]	Zdánlivý příkon
Pr	[-]	Prandtlovo číslo
Q_R	[-]	Počet tyčí rotorové klece
Q_S	[-]	Počet statorových drážek
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
R_k	[Ω]	Odpor kruhů nakrátko
R_{k1}	[Ω]	Odpor kruhů nakrátko mezi dvěma tyčemi
R_t	[Ω]	Odpor rotorové tyče
R_{k1}	[Ω]	Odpor kruhů nakrátko mezi dvěma tyčemi
R_{zR}	[K·W ⁻¹]	Tepelný odpor zubu rotoru
R_{zS}	[K·W ⁻¹]	Tepelný odpor zubu statoru
R_{ϑ}	[K·W ⁻¹]	Tepelný odpor
r_s	[m]	Poloměr zaoblení dna statorové drážky
S	[m ²]	Obsah plochy
S_{Cu}	[m ²]	Průřez vodičů statoru
S_{djs}	[m ²]	Plocha styku vinutí se jhem statoru
S_i	[m ²]	Plocha drážkové izolace
S_h	[m ²]	Plocha styku statorového jha a hřídelí
$S_{h\parallel}$	[m ²]	Plocha styku části hřídele s vnitřním vzduchem
$S_{\delta R}$	[m ²]	Plocha vzduchové mezery ze strany rotoru
$S_{\delta S}$	[m ²]	Plocha vzduchové mezery ze strany statoru
S_{tR}	[m ²]	Plocha tyčí rotorové klece v radiálním směru
S_{jS}	[m ²]	Plocha statorového jha v axiálním směru
$S_{jS\parallel}$	[m ²]	Plocha statorového jha v radiálním směru
S_{jR}	[m ²]	Plocha rotorového jha v axiálním směru
$S_{jR\parallel}$	[m ²]	Plocha statorového jha v radiálním směru
$S_{k,o}$	[m ²]	Plocha styku kostry a okolního chladiwa
$S_{k,\dot{s}}$	[m ²]	Plocha styku mezi ložiskovým štítem a kostrou
$S_{\check{S}}$	[m ²]	Plocha čela statorového vinutí v axiálním směru
$S_{\check{R}}$	[m ²]	Plocha boku rotorové klece

$S_{\S}$	[m ²]	Plocha vnitřní strany ložiskového štítu
$S_{\S vk}$	[m ²]	Plocha styku mezi válcovou a kruhovou částí ložiskového štítu
$S_{\S ki}$	[m ²]	Plocha styku kruhové části ložiskového štítu a vnitřního vzduchu
$S_{\S ko}$	[m ²]	Plocha styku kruhové části ložiskového štítu a okolního chladiva
$S_{\S v}$	[m ²]	Plocha styku válcové části ložiskového štítu a vnitřního vzduchu
$S_{t\parallel}$	[m ²]	Plocha rotorových tyčí ve styku s plechy rotoru
S_{zS}	[m ²]	Plocha statorového zubu v axiálním směru
$S_{zS\parallel}$	[m ²]	Plocha statorových zubů v radiálním směru
S_{zR}	[m ²]	Plocha rotorového zubu v axiálním směru
$S_{zR\parallel}$	[m ²]	Plocha rotorových zubů v radiálním směru
s_t	[m ²]	Průřez rotorové tyče
t_k	[m]	Tloušťka kostry
u_2	[m·s ⁻¹]	Vnitřní obvodová rychlost rotoru
v	[m·s ⁻¹]	Rychlost
ΔP_{j1}	[W]	Jouleovy ztráty ve vinutí statoru
ΔP_{j2}	[W]	Jouleovy ztráty v rotorové kleci
ΔP_{Fe1}	[W]	Ztráty v železe statoru
ΔP_{Fe2}	[W]	Ztráty v železe rotoru
ΔP_{jS}	[W]	Ztráty ve jhu statoru
ΔP_{jR}	[W]	Ztráty ve jhu rotoru
ΔP_{zS}	[W]	Ztráty v zubech statoru
ΔP_{zR}	[W]	Ztráty v zubech rotoru
ΔP_{Fe}	[W]	Celkové ztráty v železe
ΔP_k	[W]	Jouleovy ztráty v rotorových kruzích
ΔP_h	[W]	Jouleovy ztráty v hřídeli
ΔP_t	[W]	Jouleovy ztráty v rotorových tyčích
$\Delta \vartheta$	[°C]	Oteplení
α	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla
α_{bS}	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla z boku statorového jha
α_{δ}	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla vzduchovou mezerou
α_{bR}	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla z boku rotorového jha
$\alpha_{\check{c}S}$	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla z čela statorového vinutí
$\alpha_{\check{c}R}$	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla z boku rotorové klece
$\alpha_{\S}$	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně štítu
δ	[mm]	Šířka vzduchové mezery
λ	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Součinitel tepelné vodivosti
λ_n	[-]	Jmenovitý účinník stroje
λ_i	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Součinitel tepelné vodivosti drážkové izolace
ν	[m ² ·s ⁻¹]	Kinematická viskozita
$\xi_{\check{c}S}$	[-]	Součinitel zvýšení přenosu tepla z čela statorového vinutí
$\xi_{\check{c}R}$	[-]	Součinitel zvýšení přenosu tepla z boku rotorové klece
$\xi_{\S}$	[-]	Součinitel zvýšení přenosu tepla na vnitřní straně štítu
ρ	[kg·m ⁻³]	Hustota
η_n	[-]	Jmenovitá účinnost stroje
ϑ_1, ϑ_2	[°C]	Teploty na vstupní a výstupní straně
ϑ_0	[°C]	Teplota okolí
ω_n	[rad·s ⁻¹]	Jmenovitá úhlová rychlost stroje