



# 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

## POHON PRO BEZUCPÁVKOVÉ ČERPADLO

DRIVE FOR SEAL-LESS PUMP

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radomír Pruša

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

BRNO 2018



# Diplomová práce

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

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Bc. Radomír Pruša

**ID:** 164376

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

**NÁZEV TÉMATU:**

## Pohon pro bezucpávkové čerpadlo

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte literární rešerši
2. Popište celkovou koncepci bezucpávkového čerpadla
3. Proveďte návrh a výpočet vlastností motoru pomocí metody konečných prvků
4. Proveďte teplotní výpočet motoru pro různé provozní podmínky

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] HUZLÍK, R. Motor- generátor pro vírovou turbínu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 100s. Doktorská práce.
- [2] J. F. Gieras, M. J. Kamper, R.-J. Wang, Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines, 2nd Edition. Springer, 2008, p. 362
- [3] M. J. Kamper, R. - J. Wang, F. G. Rossouw, "Analysis and Performance Evaluation of Axial Flux Air - Cored Stator Permanent Magnet Machine with Concentrated Coils," in 2007 IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 2007, pp. 13–20.

**Termín zadání:** 5. 2. 2018

**Termín odevzdání:** 21. 5. 2018

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

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

### UPOZORNĚNÍ:

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

## **Abstrakt**

Cílem předkládané diplomové práce je navrhnout pohon pro bezucpávkové odstředivé čerpadlo. Navržený motor s axiálním magnetickým tokem je oboustranné struktury s vnitřním bezželezným statorem. Konstrukce bezucpávkového čerpadla vychází z patentu č. 17818, který byl vytvořen na Odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana VUT v Brně. Potenciální využití sestavy je možné zejména v potravinářském odvětví eventuálně v oblasti chemicky agresivních kapalin. Návrh motoru je založen na koordinaci mezi analytickými vztahy a metodou konečných prvků softwaru ANSYS Maxwell. Prostřednictvím iteračního řešení tepelné sítě byly vyšetřovány teplotní poměry uvnitř motoru v případě chlazení proudícím vzduchem. Součástí práce je literární rešerše na téma konstrukce axiálních strojů a jejich aplikací v čerpadlech. Čtvrtá kapitola se věnuje samotné koncepci a specifikaci bezucpávkového odstředivého čerpadla.

## **Klíčová slova**

axiální magnetický tok, bezucpávkové odstředivé čerpadlo, diskový motor, elektromagnetismus, metoda konečných prvků, tepelná síť

## **Abstract**

The aim of this thesis is to design a drive for seal-less centrifugal pump. Designed motor with axial magnetic flux is a double-sided structure with an internal coreless stator. The construction of the seal-less pump is based on a patent no. 17818, which was created at the Victor Kaplan Department of Fluid Engineering BUT. Potential use of this assembly is mainly in the food industry, possibly in the field of chemically aggressive liquids. The whole design is based on coordination between analytical equations and finite element method of the software ANSYS Maxwell. The temperature ratios inside the motor were investigated when cooling with air by the iterative solution of thermal circuit. The work includes research on the topic of constructing the axial machines and their applications in pumps. A comprehensive specification of the entire seal-less centrifugal pump is given in Chapter 4.

## **Keywords**

axial magnetic flux, seal-less centrifugal pump, disc type motor, electromagnetism, finite element method, thermal circuit

### **Bibliografická citace:**

PRUŠA, R. *Pohon pro bezucpávkové čerpadlo*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 108 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc..

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Pohon pro bezucpávkové čerpadlo jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené 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 **21. května 2018**

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Čestmíru Ondrůškovi, CSc. a odbornému vedoucímu Ing. Rostislavu Huzlíkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne **21. května 2018**

.....  
podpis autora

# Obsah

|          |                                                              |           |
|----------|--------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Úvod.....</b>                                             | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Stroj s axiálním magnetickým tokem.....</b>               | <b>2</b>  |
| 2.1      | <i>Historie .....</i>                                        | <i>2</i>  |
| 2.2      | <i>Využití .....</i>                                         | <i>3</i>  |
| 2.3      | <i>Obecné vlastnosti a konstrukční specifika.....</i>        | <i>3</i>  |
| <b>3</b> | <b>Rešerše axiálních strojů .....</b>                        | <b>5</b>  |
| 3.1      | <i>Klasifikace strojů s axiálním magnetickým tokem .....</i> | <i>5</i>  |
| 3.1.1    | Jednostranná struktura .....                                 | 6         |
| 3.1.2    | Oboustranné stroje s vnitřním rotorem – typ Kaman .....      | 7         |
| 3.1.3    | Oboustranné stroje s vnitřním statorem – typ Torus .....     | 7         |
| 3.1.4    | Vícestupňová struktura .....                                 | 8         |
| 3.1.5    | Hybridní stroj .....                                         | 9         |
| 3.2      | <i>Konstrukce z oblasti čerpadel.....</i>                    | <i>10</i> |
| 3.2.1    | Krevní pumpa .....                                           | 10        |
| 3.2.2    | Integrovaný motor s čerpadlem.....                           | 11        |
| 3.2.3    | Přímý pohon odstředivého čerpadla.....                       | 12        |
| <b>4</b> | <b>Bezucpávkové odstředivé čerpadlo .....</b>                | <b>13</b> |
| 4.1      | <i>Základní uspořádání.....</i>                              | <i>13</i> |
| 4.2      | <i>Parametry oběžného kola .....</i>                         | <i>14</i> |
| 4.3      | <i>Ložiskový systém .....</i>                                | <i>15</i> |
| 4.4      | <i>Pohon čerpadla .....</i>                                  | <i>16</i> |
| <b>5</b> | <b>Návrh motoru s axiálním tokem.....</b>                    | <b>17</b> |
| 5.1      | <i>Požadované parametry pohonu .....</i>                     | <i>17</i> |
| 5.2      | <i>Analytický výpočet.....</i>                               | <i>19</i> |
| 5.2.1    | Rozměry a parametry vinutí statoru .....                     | 20        |
| 5.2.2    | Návrh permanentních magnetů .....                            | 21        |
| 5.2.3    | Náhradní parametry motoru .....                              | 23        |
| 5.2.4    | Hmotnosti a momenty setrvačnosti motoru .....                | 23        |
| 5.2.5    | Ztráty a účinnost motoru .....                               | 23        |

|       |                                                            |           |
|-------|------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.3   | <i>Statická analýza magnetického pole v motoru.....</i>    | 25        |
| 5.3.1 | ANSYS Maxwell .....                                        | 25        |
| 5.3.2 | Vytvoření modelu .....                                     | 25        |
| 5.3.3 | Definice materiálů .....                                   | 27        |
| 5.3.4 | Plochy pro zobrazení magnetické indukce v motoru.....      | 27        |
| 5.3.5 | Výpočetní síť – mesh .....                                 | 28        |
| 5.3.6 | Ověření střední magnetické indukce ve vinutí.....          | 28        |
| 5.3.7 | Ověření sycení rotorového jha.....                         | 31        |
| 5.3.8 | Průběh magnetické indukce v objemu vinutí.....             | 31        |
| 5.3.9 | Ověření okrajových podmínek a orientace magnetů .....      | 32        |
| 5.4   | <i>Transientní analýza magnetického pole v motoru.....</i> | 32        |
| 5.4.1 | Model vinutí .....                                         | 33        |
| 5.4.2 | Výpočetní síť – mesh .....                                 | 34        |
| 5.4.3 | Výpočet indukovaného napětí .....                          | 35        |
| 5.4.4 | Analýza motoru při zatížení.....                           | 39        |
| 5.4.5 | Vliv vychýlení rotorů na činnost motoru.....               | 42        |
| 5.5   | <i>Tepelný výpočet .....</i>                               | 45        |
| 5.5.1 | Stanovení vstupních podmínek výpočtu.....                  | 45        |
| 5.5.2 | Celková tepelná síť motoru s bezželezným statorem .....    | 47        |
| 5.5.3 | Zjednodušená tepelná síť motoru .....                      | 49        |
| 5.5.4 | Zpětné výpočetní ověření zjednodušené tepelné sítě .....   | 51        |
| 5.5.5 | Ověření výpočetní sítě pomocí ANSYS Simplorer .....        | 52        |
| 5.5.6 | Výpočet oteplení pro různé provozní podmínky.....          | 53        |
| 5.6   | <i>Souhrn parametrů navrženého motoru.....</i>             | 56        |
|       | <b>Závěr .....</b>                                         | <b>58</b> |
|       | <b>Literatura .....</b>                                    | <b>60</b> |
|       | <b>Seznam symbolů, veličin a zkratk.....</b>               | <b>66</b> |
|       | <b>Seznam příloh.....</b>                                  | <b>75</b> |

# Seznam obrázků

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 1: a) [19] a b) axiální stroje M. Faradaye [24], c) axiální stroj N. Tesly [2].....                                                                          | 2  |
| Obr. 2: Komerčně vyráběné motory s axiálním magnetickým tokem [20].....                                                                                           | 3  |
| Obr. 3: Základní schématické rozdělení strojů s axiálním tokem.....                                                                                               | 5  |
| Obr. 4: Typy vinutí a) rozložené, b) toroidální (převzato z [2]) .....                                                                                            | 5  |
| Obr. 5: Typy vinutí a) soustředné [2], b) soustředné s fázemi u sebe [11].....                                                                                    | 6  |
| Obr. 6: Jednostranná struktura AFPM (upraveno z [10]).....                                                                                                        | 6  |
| Obr. 7: Oboustranná topologie (Torus) s vnitřní rotorem – a) nedrážkovaný, b) drážkovaný stator (upraveno z [9]).....                                             | 7  |
| Obr. 8: Oboustranná topologie (Torus) s vnitřním statorem a) SS – nedrážkovaný, b) SS – drážkovaný, c) SJ – drážkovaný, d) SJ – bezželezný (upraveno z [10])..... | 8  |
| Obr. 9: Vícestupňová struktura a) SJ – drážkovaný, b) SS – drážkovaný, c) SJ – bezželezný stator (upraveno z [10]).....                                           | 9  |
| Obr. 10: Hybridní stroj se třemi a) statory, b) rotory (upraveno z [10]) .....                                                                                    | 9  |
| Obr. 11: Krevní pumpa a) řez, b) motor (upraveno z [12]) .....                                                                                                    | 10 |
| Obr. 12: a) Čerpadlo s integrovaným motorem b) statorové vinutí na desce plošného spoje (převzato a upraveno z [7]) .....                                         | 11 |
| Obr. 13: Řez integrovaným čerpadlem s axiálním motorem (upraveno z [7]) .....                                                                                     | 11 |
| Obr. 14: Sestava odstředivého čerpadla představená v literatuře [8].....                                                                                          | 12 |
| Obr. 15: Halbachovo uspořádání permanentních magnetů (převzato z [14]) .....                                                                                      | 12 |
| Obr. 16: Zjednodušený náčrt bezucpávkového čerpadla (upraveno z [6]) .....                                                                                        | 13 |
| Obr. 17: Náčrtek odstředivého čerpadla: a) čelní pohled, b) pohled v řezu.....                                                                                    | 14 |
| Obr. 18: Magnetické ložisko: a) aktivní radiální (řez), b) pasivní axiální.....                                                                                   | 15 |
| Obr. 19: Těsnicí labyrint aktivního magnetického ložiska.....                                                                                                     | 16 |
| Obr. 20: Fotografie oběžného kola a statoru bezucpávkového čerpadla .....                                                                                         | 16 |
| Obr. 21: Příklady pohybu tělesa v šesti stupních volnosti .....                                                                                                   | 18 |
| Obr. 22: Pracovní kvadrant permanentního magnetu.....                                                                                                             | 21 |
| Obr. 23: Náčrtek s rozměry rotorového permanentního magnetu.....                                                                                                  | 22 |
| Obr. 24: Rozdělení příkonu soustavy motoru s magnetickými ložisky.....                                                                                            | 24 |
| Obr. 25: a) řez – ½ axiálního motoru, b) PM, c) vinutí pro statickou analýzu .....                                                                                | 25 |
| Obr. 26: a) „Master“, b) „Slave“, c) „Zero Tangential H Field“ .....                                                                                              | 26 |
| Obr. 27: Magnetizační charakteristika materiálu „steel_1010“ .....                                                                                                | 27 |
| Obr. 28: Plochy pro zobrazení rozložení magnetického pole .....                                                                                                   | 28 |

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 29: Zobrazení výpočetní sítě a) celkový pohled, b) řezová rovina „b“.....                                      | 28 |
| Obr. 30: Závislost magnetické indukce na tloušťce a pólovém krytí magnetů .....                                     | 29 |
| Obr. 31: Rozložení magnetické indukce na rovině „a“ .....                                                           | 30 |
| Obr. 32: Rozložení magnetické indukce v rovině a) „b“ a b) „c“ .....                                                | 31 |
| Obr. 33: Průběh magnetické indukce v objemu vinutí .....                                                            | 31 |
| Obr. 34: Zobrazení vektorů magnetické indukce na ploše d .....                                                      | 32 |
| Obr. 35: Model a) cívky s ohnutým čelem, b) cívky s vysokým čelem a c) třífázového vinutí.....                      | 33 |
| Obr. 36: a) sestava motoru bez „band“, b) kompletní model, c) dělené cívky .....                                    | 33 |
| Obr. 37: Výpočetní síť – transienční analýza a) úplný model, b) řez na ploše „d“ ....                               | 34 |
| Obr. 38: Spřažený magnetický tok ve fázi U, V, W (před korekcí počtu závitů).....                                   | 35 |
| Obr. 39: Indukované napětí ve fázi U, V, W (před korekcí počtu závitů).....                                         | 35 |
| Obr. 40: FFT indukovaného napětí ve fázi W (před korekcí počtu závitů).....                                         | 36 |
| Obr. 41: Průběh indukovaného napětí ve fázi U, V, W (po korekci počtu závitů) ....                                  | 37 |
| Obr. 42: FFT indukovaného napětí ve fázi W (po korekci počtu závitů) .....                                          | 38 |
| Obr. 43: Průběh sdružených indukovaných napětí (po korekci počtu závitů) .....                                      | 38 |
| Obr. 44: Závislost vnitřního momentu na zátěžném úhlu pro rozdílné velikosti proudu .....                           | 40 |
| Obr. 45: Závislost vnitřního momentu na zátěžném úhlu pro rozdílné teploty magnetů .....                            | 40 |
| Obr. 46: Průběh napájecího napětí motoru při $I_n$ , $n_n$ a $\beta = 90^\circ$ .....                               | 41 |
| Obr. 47: Náhradní schéma jedné fáze synchronního motoru .....                                                       | 41 |
| Obr. 48: Vychýlení: a) axiální v ose x, b) úhlové v rovině xy, b) radiální v ose y.....                             | 42 |
| Obr. 49: Změna indukovaného napětí v závislosti na vychýlení v ose z při $I_n$ , $n_n$ .....                        | 43 |
| Obr. 50: Změna vnitřního momentu při axiálním vychýlení (při $I_n$ , $n_n$ a $\beta = 90^\circ$ ) ....              | 43 |
| Obr. 51: Změna vnitřního momentu při úhlovém vychýlení od roviny xy (při $I_n$ , $n_n$ a $\beta = 90^\circ$ ) ..... | 44 |
| Obr. 52: Závislost vnitřního momentu na radiálním vychýlení motoru (při $I_n$ , $n_n$ a $\beta = 90^\circ$ ).....   | 44 |
| Obr. 53: Uvažovaný model pro tepelnou analýzu a) řez, b) boční pohled – $\frac{1}{4}$ .....                         | 45 |
| Obr. 54: Sycení rotorového disku s ventilačními otvory.....                                                         | 46 |
| Obr. 55: Celkové tepelné schéma motoru s bezželezným statorem chlazeným proudícím vzduchem (upraveno z [2]).....    | 48 |
| Obr. 56: Zjednodušená tepelná síť axiálního stroje s bezželezným statorem (upraveno z [2]).....                     | 50 |

|                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 57: Tepelné toky vstupujících a vystupujících z ½ motoru .....                                                                                                             | 51 |
| Obr. 58: Zjednodušená tepelná síť zhotovená v software ANSYS Simplorer .....                                                                                                    | 52 |
| Obr. 59: Závislost oteplení motoru na velikosti otáček při jmenovitém proudu a rychlosti proudění vzduchu skrze chladicí otvory $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .....       | 53 |
| Obr. 60: Závislost oteplení motoru na velikosti proudu při jmenovitém počtu otáček a rychlosti proudění vzduchu skrze chladicí otvory $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ..... | 54 |
| Obr. 61: Závislost oteplení motoru na rychlosti proudění vzduchu přes chladicí otvory při jmenovitém proudu a jmenovitých otáčkách motoru .....                                 | 55 |
| Obr. 62: Závislost oteplení statoru na velikosti proudu a rychlosti proudění vzduchu chladicími otvory při jmenovitých otáčkách motoru .....                                    | 55 |
| Obr. 63: a) model rotoru, b) model statoru .....                                                                                                                                | 57 |
| Obr. 64: Model navrženého motoru a) kompletní sestava, b) ½ řez .....                                                                                                           | 57 |
| Obr. 65: Magnetický obvod axiálního stroje s bezželezným statorem .....                                                                                                         | 79 |
| Obr. 66: Naznačení elementů lichoběžníkové cívky .....                                                                                                                          | 80 |
| Obr. 67: Proudění a) laminární, b) laminární – turbulentní (upraveno z [2]) .....                                                                                               | 88 |

# Seznam tabulek

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. 1: Srovnání standardních konstrukcí s AFPM topologií (převzato z [28]) ..... | 4  |
| Tab. 2: Parametry oběžného kola odstředivého čerpadla.....                        | 14 |
| Tab. 3: Souhrn požadovaných parametrů pohonu.....                                 | 19 |
| Tab. 4: Vybrané axiální motory s bezželezným statorem.....                        | 19 |
| Tab. 5: Souhrn hodnot pro analytický výpočet v kapitole 5.2 .....                 | 20 |
| Tab. 6: Parametry statorového vinutí .....                                        | 21 |
| Tab. 7: Souhrn rozměrů permanentních magnetů a vlastností pro N52M [23] .....     | 22 |
| Tab. 8: Náhradní parametry motoru .....                                           | 23 |
| Tab. 9: Souhrn hmotností a momentu setrvačnosti motoru .....                      | 23 |
| Tab. 10: Ztráty a účinnosti motoru ve jmenovitém bodě při chodu ve vodě .....     | 24 |
| Tab. 11: Maximální velikost elementů – transientní analýza magnetického pole ...  | 34 |
| Tab. 12: Velikosti první harmonické složky indukovaného napětí před korekcí.....  | 36 |
| Tab. 13: Horní a spodní poloměry permanentních magnetů a cívek.....               | 37 |
| Tab. 14: Velikosti první harmonické složky indukovaného napětí po korekci.....    | 37 |
| Tab. 15: Mezní výchylky rotorů statoru navrhovaného motoru.....                   | 42 |
| Tab. 16: Zvolené parametry pro tepelný výpočet.....                               | 46 |
| Tab. 17: Rozměry motoru uvažované při tepelném výpočtu .....                      | 46 |
| Tab. 18: Ztráty motoru při provozu na vzduchu .....                               | 53 |
| Tab. 19: Oteplení při chlazení motoru proudícím vzduchem .....                    | 53 |
| Tab. 20: Souhrn parametrů navrženého axiálního motoru .....                       | 56 |

# 1 ÚVOD

Cílem této práce je navrhnout diskový motor s axiálním magnetickým tokem pro pohon bezucpávkového odstředivého čerpadla. Aplikování axiálního motoru plyne ze samotného patentu bezucpávkového čerpadla [3], vytvořeném na Odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana VUT v Brně. Důvodem využití tohoto typu pohonu je vysoký poměr výkonu k celkovému objemu, velký točivý moment a maximální využití vnitřního prostoru čerpadla.

Předností bezucpávkového čerpadla je zejména naprosté vyloučení kontaktu čerpané kapaliny s mazacími prostředky. Absence těsnících materiálů (gumových, silikonových atd.) umožňuje bezucpávkovému čerpadlu pracovat také s chemicky agresivními médii [6].

Diplomová práce navazuje na práci bakalářkou [13], která se zabývala návrhem magnetického ložiskového systému. Poloha oběžného kola s motorem bude zajištěna dvojicí aktivních radiálních magnetických ložisek spolu s pasivním axiálním magnetickým ložiskem.

Napříč průmyslovou historií byly nejčastěji využívány stroje asynchronní. Rozšířením nízkootáčkových zařízení vzrostla poptávka strojů synchronních s permanentními magnety. Pojem elektrický točivý stroj se obecně označuje standardní koncepce válcového rotoru obepnutého dutým válcem – statorem. Zmíněné uspořádání je označováno jako stroj s radiálním magnetickým tokem (RFPM). Dějiny elektrických strojů ukazují, že první elektrické točivé stroje byly realizovány ve formě strojů s axiálním magnetickým tokem (AFPM). Stroje s radiálním magnetickým tokem byly vynalezeny později [4][17].

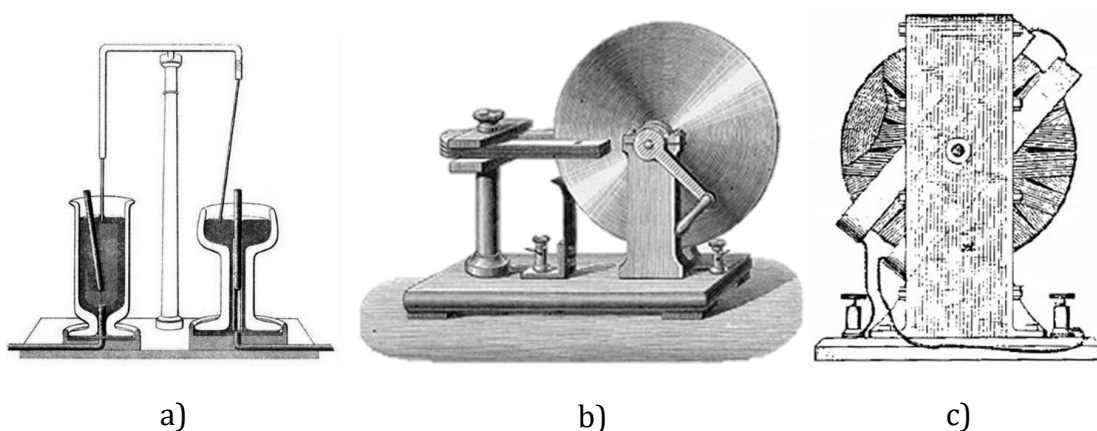
Globalizace elektrických dopravních prostředků a obnovitelných zdrojů energie posunula vývoj výkonných elektrických strojů s přímým pohonem. Pokroky v sektoru materiálového inženýrství a výrobních technologiích hrají rovněž nezanedbatelnou a důležitou roli. Požadavky většiny dnešních aplikací jsou shodné: vysoká účinnost, úspora prostoru, ekonomická výroba [9][10].

## 2 STROJ S AXIÁLNÍM MAGNETICKÝM TOKEM

Hlavním rysem strojů s axiálním magnetickým tokem (AFPM) je charakteristický diskový tvar rotorů i statorů. Mnohdy se tyto stroje rovněž označují jako stroje diskové. Význačná je malá axiální délka ale naopak větší osová výška. Permanentní magnety jsou polarizovány souhlasně s osou hřídele. V důsledku čehož je výsledný magnetický tok rovnoběžný s rotační osou. Využitím magnetů ze vzácných zemin se dosahuje výrazně vyšší výkonnosti. Významnou vlastností motorů s axiálním tokem oproti strojům s radiálním tokem (RFPM) je větší poměr točivého momentu k celkové hmotnosti stroje. Převážně se konstruují v bezkartáčovém provedení [4][10]. Princip funkce AFPM motorů je shodný s běžnými synchronními stroji, které neobsahují rozběhové vinutí a neumožňují asynchronní rozběh. Využití frekvenčního měniče je pro rozběh a chod AFPM motorů nezbytné [2].

### 2.1 Historie

První stroj s axiálním magnetickým tokem byl vynalezen v roce 1821 Michaelem Faradayem (Obr. 1 a))<sup>1</sup>. Současně se jednalo o první primitivní stejnosměrný stroj s permanentními magnety [2].



Obr. 1: a) [19] a b) axiální stroje M. Faradaye [24], c) axiální stroj N. Tesly [2]

První diskový stroj byl sestaven o deset let později v roce 1831 rovněž Michaelem Faradayem (Obr. 1 b)). Zařízení je doposud považováno za historicky první elektrický generátor [2][19]. V roce 1889 Nikola Tesla patentoval stroj využívající principu axiálního toku (Obr. 1 c)). S příchodem prvního patentu stroje s radiálním magnetickým tokem v roce 1837 byl stroj s axiálním tokem vytlačen a téměř zapomenut. Mezi hlavní důvody zavržení diskových strojů patřily velké síly

---

<sup>1</sup> Motor se skládal z dvojice permanentních magnetů ponořených ve dvou nádobách s rtutí a dvojice zavěšených vodičů. Na jedné straně bylo umožněno pohybu permanentnímu magnetu, na straně druhé byl naopak pohyb umožněn vodiči [19].

mezi rotorem a statorem, výrobní potíže a nákladná výroba. Díky dostupnosti nových materiálů a pokročilých výrobních technologií poptávka o diskové stroje v posledních letech vzrostla [2][19].

## 2.2 Využití

Stroje AFPM jsou hojně využívány v různých aplikacích s přímým pohonem bez převodového ústrojí (ventilátory, elektromobily, čerpadla, obráběcí stroje, centrifugy, robotika atd.). Dané oblasti využívají jejich extrémní kompaktnosti v axiálním směru [2] [10].

Díky rotorům o velkém průměru s vysokým momentem setrvačnosti se tyto stroje dají současně využít jako setrvačníky. Modifikací výpočetních vztahů je možné zkonstruovat i generátory s axiálním tokem. Běžně se vyrábí jako malé a střední generátory [17].

Vícepólové varianty jsou ideální pro zařízení s malou rychlostí, jakou jsou trakční pohony, kladkostroje nebo větrné elektrárny [17].

Obr. 2 znázorňuje komerční provedení diskových motorů. Výrobce prezentuje výkonovou variabilitu přidáváním dalších segmentů – prodlužováním axiální délky (viz kapitola 3.1.4 vícestupňová struktura).



Obr. 2: Komerčně vyráběné motory s axiálním magnetickým tokem [20]

## 2.3 Obecné vlastnosti a konstrukční specifiky

Větší průměr rotoru zapříčiňuje vznik velkých odstředivých sil, které je nutné uvažovat při upevňování rotorových permanentních magnetů. Další komplikací přináší rotorové axiální síly, v jejichž důsledku dochází ke značnému namáhání ložiskového uložení. U mechanických ložisek dochází k zvýšené hlučnosti, nesouvislé vrstvě mazacího filmu a zvýšenému namáhání funkčních ploch [25].

Naopak velkou výhodou je minimalizace Joulových ztrát v čelech vinutí oproti RFPM, a to díky velkému poměru mezi aktivní a neaktivní mědi statorového vinutí. Axiální stroje umožňují snadnou změnu velikosti vzduchové mezery a výrazně jednodušeji se konstruuji vícepólové stroje oproti RFPM [4][17].

Srovnání přímých a nepřímých pohonů při současném srovnání AFPM a RFPM topologií znázorňuje Tab. 1, která byla sestavena z podkladů zdroje [28]. Z tabulky vyplývá, že při daných jmenovitých parametrech jsou přímé AFPM topologie výhodnější (účinnost, hmotnost, spolehlivost, snadná instalace, náklady na údržbu).

**Tab. 1: Srovnání standardních konstrukcí s AFPM topologií (převzato z [28])**

| Jmenovité parametry:<br>Výkon: <b>100 kW</b><br>Otáčky: <b>60 ot·min<sup>-1</sup></b><br>Moment: <b>16 kNm</b> | S převodovým<br>ústrojím | Bez převodového ústrojí<br>přímý pohon |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------|-------|
|                                                                                                                | Asynchronní<br>motor     | RFPM                                   | AFPM  |
| Účinnost [%]                                                                                                   | 80-88                    | 92-95                                  | 95-97 |
| Axiální délka [mm]                                                                                             | 1500                     | 95                                     | 140   |
| Hmotnost [kg]                                                                                                  | 2500                     | 3700                                   | 850   |
| Investiční náklady                                                                                             | \$                       | \$\$                                   | \$    |
| Spolehlivost                                                                                                   | *                        | ***                                    | ***   |
| Snadnost instalace                                                                                             | *                        | *                                      | **    |
| Náklady na údržbu                                                                                              | Velmi vysoké             | Nízké                                  | Nízké |

Optimalizací tvaru permanentních magnetů je možné snížit vznik vyšších harmonických složek, a tím současně snížit harmonické zkreslení indukovaného napětí. V případě drážkovaných strojů je tvar permanentních magnetů důležitý z pohledu reluktančního momentu (coggingu) [2][17].

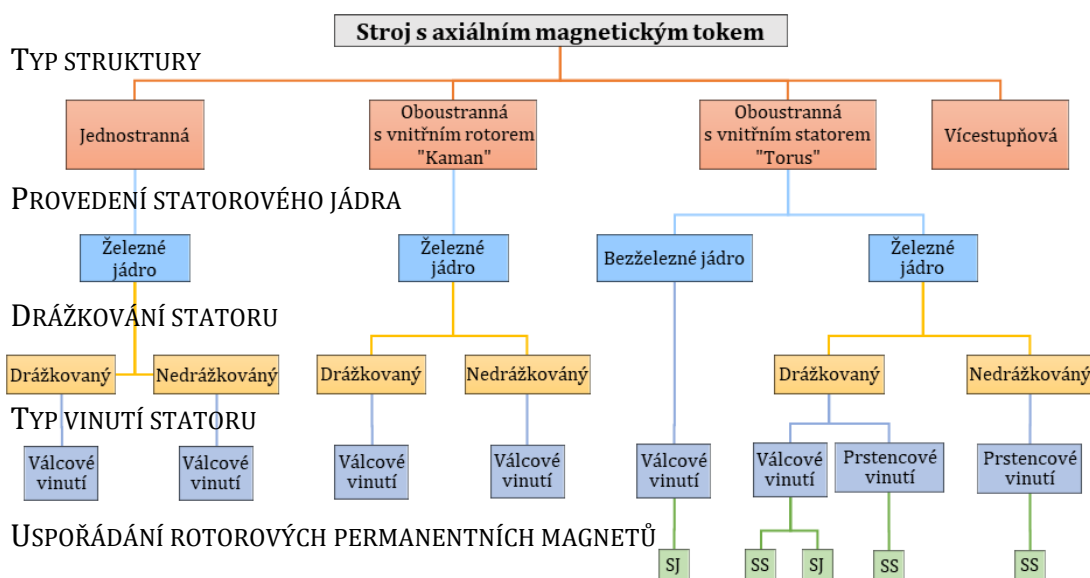
U běžných RFMP strojů s vnitřním válcovým rotorem a vnějším statorem je chlazení rotorových magnetů problematické. Důvodem je těsná blízkost statorového vinutí (velké ztráty) a permanentních magnetů. Chlazení může probíhat pouze v malé vzduchové mezeře ve tvaru válcového mezikruží. Naproti tomu axiální diskové stroje jsou z pohledu chlazení výhodně uspořádané. Rotorové disky (nesoucí permanentní magnety) jsou v převážné většině strojů umístěny po stranách statoru a vzniklé teplo lze účinně odvádět [2][10].

Řízení strojů s axiálním magnetickým tokem je dle [2] shodné s řízením běžných synchronních strojů s radiálním magnetickým tokem. Problematika samotného řízení synchronních strojů je obecně známá a zabývá se jí řada publikací například [26] případně [27] a jiné. Předkládaná diplomové práce se proto řídicími topologiemi a algoritmy dále nezabývá.

## 3 REŠERŠE AXIÁLNÍCH STROJŮ

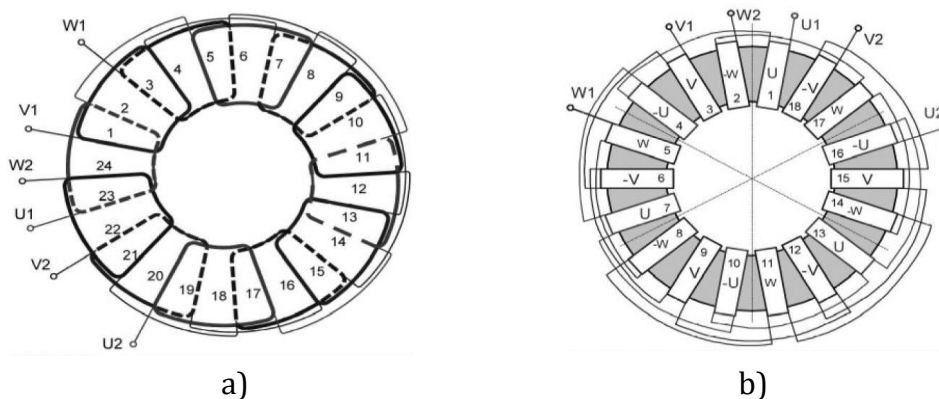
### 3.1 Klasifikace strojů s axiálním magnetickým tokem

Stroje s axiálním magnetickým tokem nabízí širokou škálu konstrukčních topologií. Každá topologie má své charakteristické vlastnosti, které předurčují daný stroj pro použití v konkrétní aplikaci (viz kapitola 2.2). Obecná klasifikace AFPM strojů je v této diplomové práci provedena obdobným způsobem jako v literatuře [9]. Základ tvoří stromový diagram se čtyřmi hierarchickými úrovněmi (viz Obr. 3). Popis struktur v kapitolách 3.1.1 až 3.1.4 byl vytvořen na základě získaných informací z literárních pramenů [2], [4], [9], [10], [11] a [17].



Obr. 3: Základní schématické rozdělení strojů s axiálním tokem

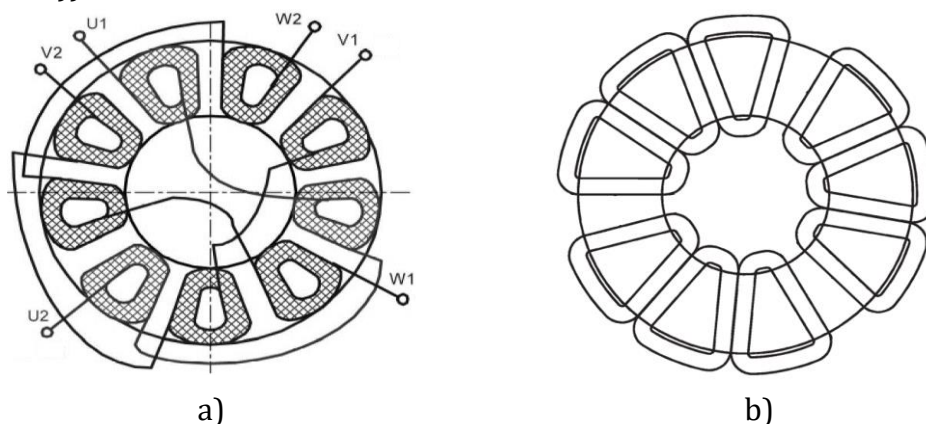
Nejvyšší úroveň je obsazena čtyřmi nejobecnějšími strukturami definovanými počtem rotorů a statorů. Další úroveň je určena přítomností případně nepřítomností železného jádra na statoru.



Obr. 4: Typy vinutí a) rozložené, b) toroidální (převzato z [2])

Stroje s axiálním magnetickým tokem mohou obsahovat dva rozdílné typy vinutí: vinutí válcové (rovněž označované jako bubnové) a prstencové (toroidální). Odlišnost obou typů vinutí je dána polohou čel.

Čela cívek bubnového vinutí jsou umístěna podél vnitřního a vnějšího obvodu. Bubnové vinutí je možné dělit na vinutí překrývající (rozložené – viz Obr. 4 a)) a na vinutí nepřekrývající (soustředné – viz Obr. 5 a)). V určitých aplikacích je možné také aplikovat soustředné vinutí s cívkami stejné fáze situovanými u sebe (viz Obr. 5 b)).

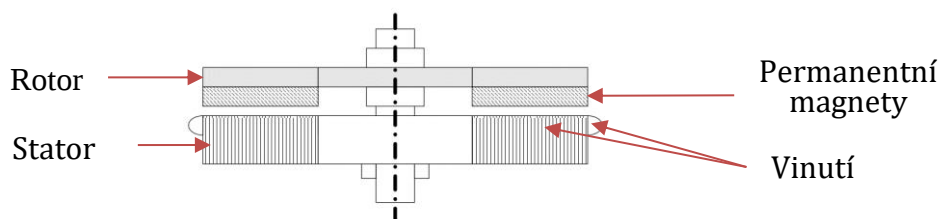


Obr. 5: Typy vinutí a) soustředné [2], b) soustředné s fázemi u sebe [11]

Prstencové vinutí se používá pouze pro stroje Torus a jsou obecně preferovanou variantou. Umožňují maximalizovat aktivní část cívek a minimalizovat délku cívkových čel. Vinutí je složeno z jednotlivých toroidů, jak znázorňuje Obr. 4 b). Následující úroveň dělí železná jádra statoru dle drážkování. Uspořádání polarizace permanentních magnetů se vztahuje pouze pro podstrukturu typu Torus (viz kapitola 3.1.3).

### 3.1.1 Jednostranná struktura

Jedná se o nejjednodušší topologii strojů s axiálním tokem. Základ stroje tvoří sestava statoru a rotoru (viz Obr. 6). Nevýhoda tohoto uspořádání spočívá ve vzniku axiální síly mezi rotorem a statorem, která není kompenzována. To přináší požadavek na složitější ložiskový systém a mohutnější rotorový disk. Stator může být drážkovaný nebo nedrážkovaný. Jednostranné topologie dosahují oproti oboustranným strukturám nižších točivých momentů.

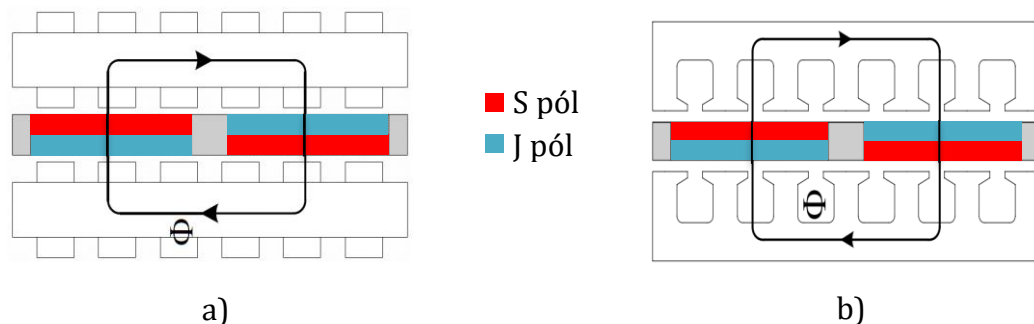


Obr. 6: Jednostranná struktura AFPM (upraveno z [10])

### 3.1.2 Oboustranné stroje s vnitřním rotorem – typ Kaman

Stroje tohoto typu obsahují rotor s permanentními magnety, který je umístěn mezi dvojicí vinutých statorů. Podobně jako jednostranné stroje mohou být jednotlivé statory drážkované (Obr. 7 b)) nebo nedrážkované (Obr. 7 a)). Oboustranná topologie odstraňuje nevýhodu jednostranné struktury. V případě shodných vzduchových mezer (rotor-stator a stator-rotor) je výslednice přitažlivých sil rovna nule. Tím se odstraní přílišné mechanické namáhání konstrukčních částí. Způsob zapojení obou statorů ovlivňuje výsledné vlastnosti stroje: vyšší proud v paralelním spojení a vyšší napětí při spojení do série.

Možné jsou rovněž stroje s bezželezným rotorem, kde jednotlivé magnety se nachází na magneticky nevodivém materiálu (např. sklotextit). Přínosem tohoto uspořádání je výrazné snížení celkové hmotnosti stroje.

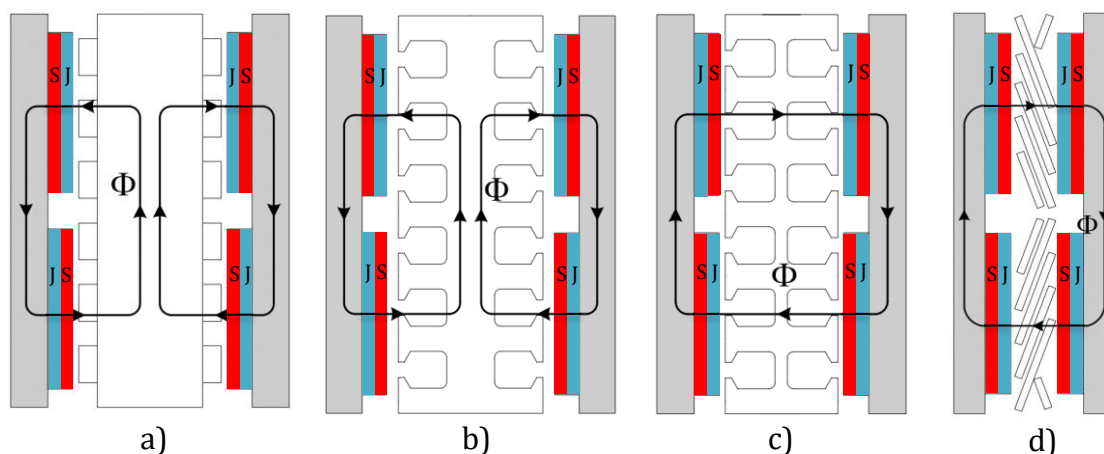


Obr. 7: Oboustranná topologie (Torus) s vnitřní rotorem – a) nedrážkovaný, b) drážkovaný stator (upraveno z [9])

### 3.1.3 Oboustranné stroje s vnitřním statorem – typ Torus

Permanentní magnety obou rotorů se převážně montují na feromagnetický materiál, který usnadňuje průchod magnetického toku mezi sousedními magnety. Moment je vytvářen oběma stranami vinutí statoru. V případě jednostranné a oboustranné struktury s vnitřním rotorem je moment vytvářen pouze jednou cívkovou stranou. Existují dva rozdílné způsoby uspořádání rotorových magnetů:

- První z možností je uspořádat protilehlé magnety tak, aby jejich magnetizace byla opačná (známé pod označením SS – sever-sever). Zde se daný magnetický tok uzavírá vždy přes stator a pouze jediný rotor (Obr. 8 a) a b)).
- Druhou možností je konfigurace známá pod označením SJ – sever-jih. Jednotlivé magnety se orientují takovým způsobem, aby jejich směr magnetizace byl na obou rotorech ve shodném směru. Magnetický tok se uzavírá přes oba rotory. Statorové jádro je možné redukovat na jádro stávající se pouze z feromagnetických zubů (Obr. 8 c) a d)). Při tomto uspořádání nelze využít toroidálního vinutí, protože by došlo k vyrušení sil a na rotorové disky by nepůsobil žádný moment.



Obr. 8: Oboustranná topologie (Torus) s vnitřním statorem a) SS – nedrážkovaný, b) SS – drážkovaný, c) SJ – drážkovaný, d) SJ – bezželezný (upraveno z [10])

### Typ „coreless“

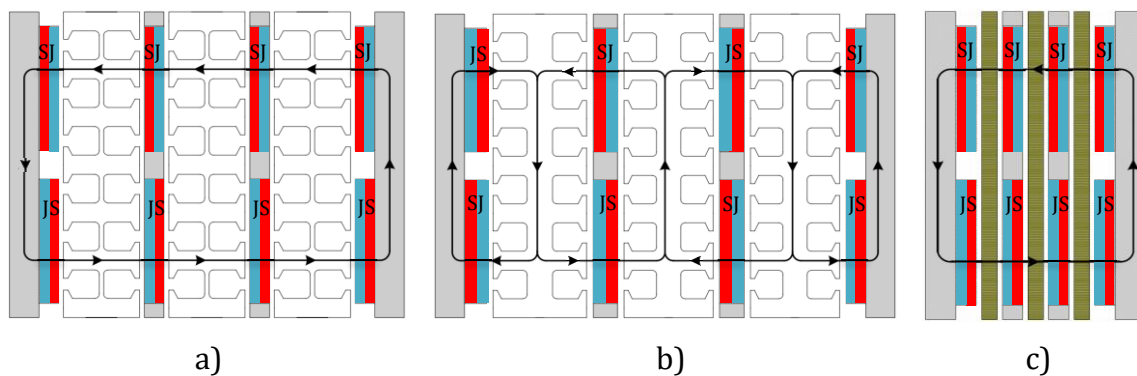
Stator se vyznačuje absencí feromagnetického jádra (Obr. 8 d)). Cívky statoru se navinou a umístí se do vzduchové mezery mezi dvojicí rotorů. Celistvost statoru se zajišťuje zalitím cívek epoxidovou pryskyřicí. Společně tak vytváří kompaktní celek, který je vhodný pro uchycení do kostry stroje. Velikost vzduchové mezery musí být volena s ohledem na teplotní roztažnost a následnou deformaci zalévací epoxidové pryskyřice a vinutí.

V neželezném statorovém jádru nedochází k vzniku vířivých a hysterezních ztrát, naopak problematické jsou vířivé ztráty ve statorovém vinutí. Ty jsou způsobeny průchodem pracovního magnetického toku skrze vinutí, které není umístěno v drážkách jako u běžných strojů.

Relativní permeabilita statoru je blízká jedné, z tohoto důvodu zde dochází k vzniku velkých rozptylových toků a prodlužování efektivní délky vzduchové mezery. Pro pokrytí velkých úbytků magnetického napětí na malých permeabilitách statoru a vzduchových mezerách je důležité vytvořit dostatečně velké magnetické napětí. Pro dosažení potřebných parametrů je obvykle použito statorových cívek s velkým počtem závitů a permanentních magnetů s dostatečnou tloušťkou.

### 3.1.4 Vícestupňová struktura

Smyslem vícestupňové struktury je střídavě umístit statory a rotory tak, aby byly splněny požadované parametry (výstupní moment nebo mechanický výkon na hřídeli). Jednotlivá provedení na Obr. 9 jsou vytvořena sériovým řazením strojů z kapitoly 3.1.3. Značnou výhodou je modularita. V závislosti na okamžitých požadavcích je možné odpojování a případné opětovné připojení jednotlivých stupňů. Spojení mezi stupni lze provést sériově nebo paralelně. Stroje umožňují pracovat i v případě, že některý ze stupňů je poškozen nebo odpojen.

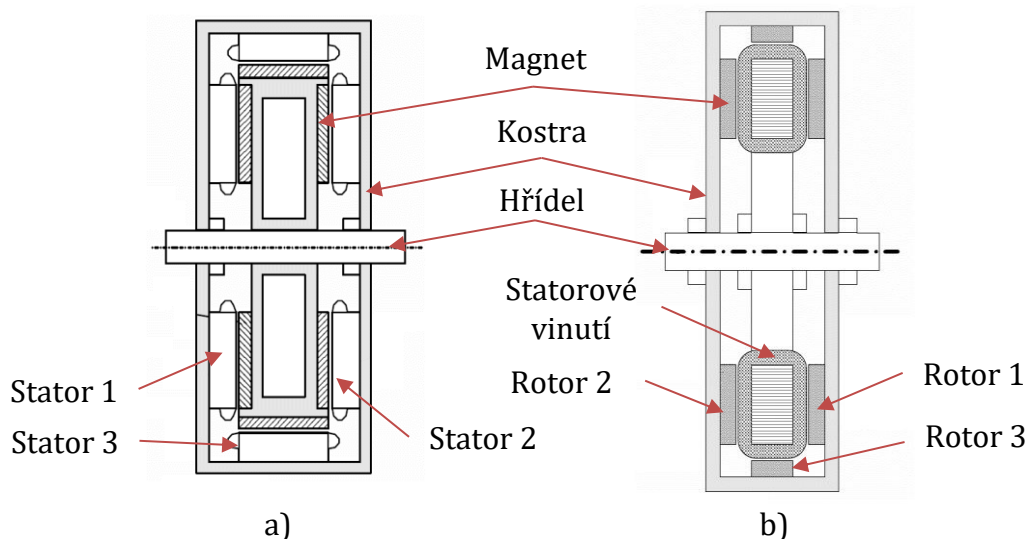


Obr. 9: Vícestupňová struktura a) SJ – drážkovaný, b) SS – drážkovaný, c) SJ – bezželezný stator (upraveno z [10])

### 3.1.5 Hybridní stroj

Hybridní axiální stroje byly představeny v literaturách [10], [29] a [30]. Kombinují stroj s axiálním a radiálním magnetickým tokem.

Základem konstrukce stroje na Obr. 10 a) jsou dvě skupiny rotorových permanentních magnetů. Magnety umístěné po stranách rotorového disku vytváří magnetický tok přes axiální vzduchovou mezeru. Naopak magnety umístěné po obvodu rotoru vytváří radiální magnetický tok přes vzduchovou mezeru. Díky takovému uspořádání jsou obě strany i plášť rotoru momentotvorné. Výsledkem je vysoký poměr výkonu k celkovému objemu stroje.



Obr. 10: Hybridní stroj se třemi a) statory, b) rotory (upraveno z [10])

Další provedení hybridního stroje se nachází na Obr. 10 b). Oproti předchozí variantě se konstrukce liší v umístění statorového vinutí, které je situováno ve střední části stroje. Rotorové magnety obepínají statorové vinutí ze tří stran (momentotvorné strany vinutí). Točivý moment negeneruje pouze strana vinutí na vnitřním průměru statoru. Autoři v článcích zmiňují, že představené varianty disponují pouze malou mechanickou odolností, která běžně nedostačuje.

## 3.2 Konstrukce z oblasti čerpadel

### 3.2.1 Krevní pumpa

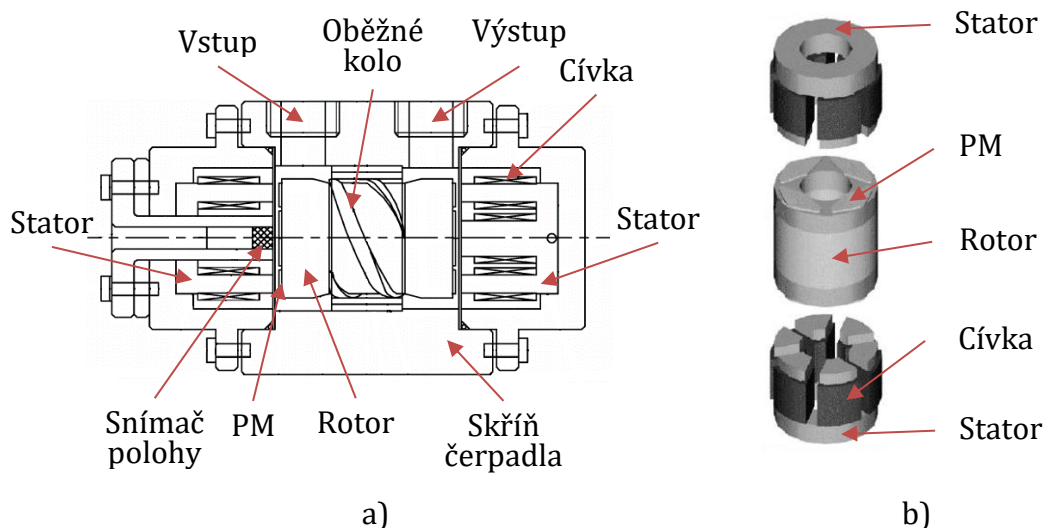
Krevní pumpy se zpravidla do lidského těla umisťují mezi levou srdeční komoru a aortu. Pro použití v těle musí sestavy nekompromisně splňovat řadu podmínek:

- materiálová kompatibilita s lidským tělem,
- vysoká odolnost a spolehlivost,
- délka nepřesahující 60 mm a maximální průměr 30 mm,
- alespoň 5000 otáček za minutu,
- malé oteplení [5][12].

Pro pohon krevních pump jsou nejvhodnější stroje s axiálním magnetickým tokem. Důvodem je vysoká hustota výkonu, malá spotřeba energie a kompaktní rozměry. Přenos energie do motoru je možné realizovat dvojicí cívek pomocí elektromagnetické indukce (cívka se implantuje přímo pod kůží) [5][12].

Autoři článku [12] navrhli a vytvořili konstrukci axiálního motoru, který zastává funkci axiálního magnetického ložiska. Skladbu představeného čerpadla znázorňuje Obr. 11 a). Za vhodnou konstrukci byla vybrána oboustranná struktura s vnitřním rotorem (viz Obr. 11 b)), která umožňuje umístit oběžné kolo po vnějším obvodu. Axiální stabilita je zajištěna pomocí aktivního řízení polohy. Při radiálních posunech či náklonech se systém spoléhá pouze na pasivní stabilitu hydrodynamického ložiska. Vlivem špatného tlumení může docházet k poškození některých elementů čerpané krve, a tím k tvorbě sraženin a stresu krevních buněk.

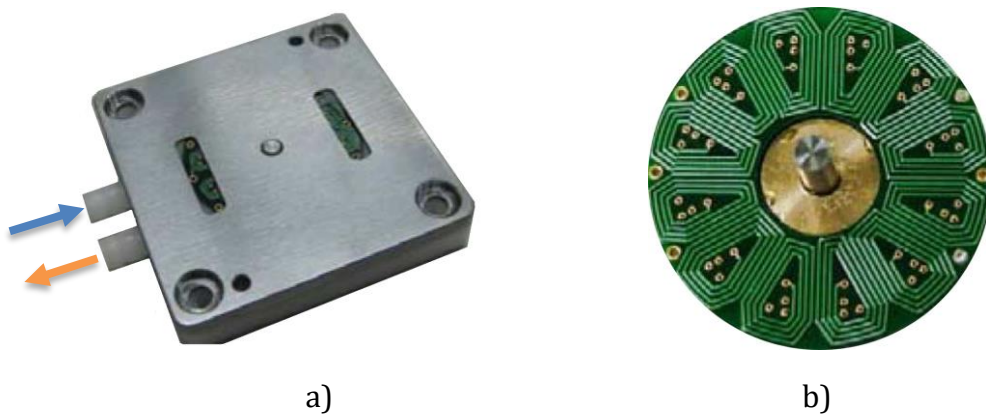
Stroj se skládá z válcového rotoru (nejedná se o klasický diskový tvar). Oba statory jsou tvořeny šesti statorovými zuby s třífázovým vinutím, které generují magnetický tok ve vzduchové mezeře.



Obr. 11: Krevní pumpa a) řez, b) motor (upraveno z [12])

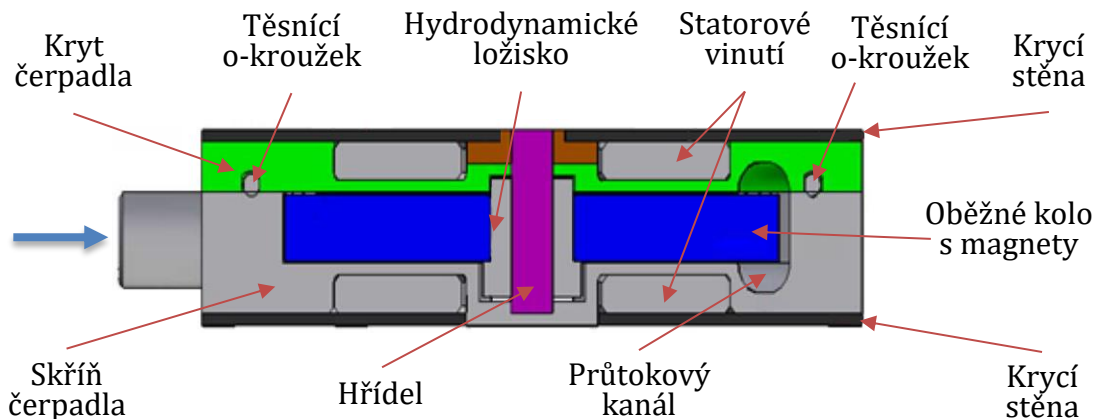
### 3.2.2 Integrovaný motor s čerpadlem

S rostoucím výkonem výpočetní techniky současně roste i generace tepla od samotných výkonových členů. Chlazení pouhým nuceným prouděním vzduchu přestává být dostačující. V poslední době chladicí okruhy výkonových komponentů jsou navrhovány převážně kapalinové. Běžná cirkulační čerpadla obsahují poměrně komplikovanou vnitřní strukturu, která neumožňuje redukci vnějších rozměrů. Pro přenosná zařízení jsou běžné konstrukce čerpadel naprosto nevhodné. Tento problém vyřešili autoři v článku [7] pomocí vírového čerpadla s integrovaným motorem s axiálním magnetickým tokem (Obr. 12 b)).



Obr. 12: a) Čerpadlo s integrovaným motorem b) satorové vinutí na desce plošného spoje (převzato a upraveno z [7])

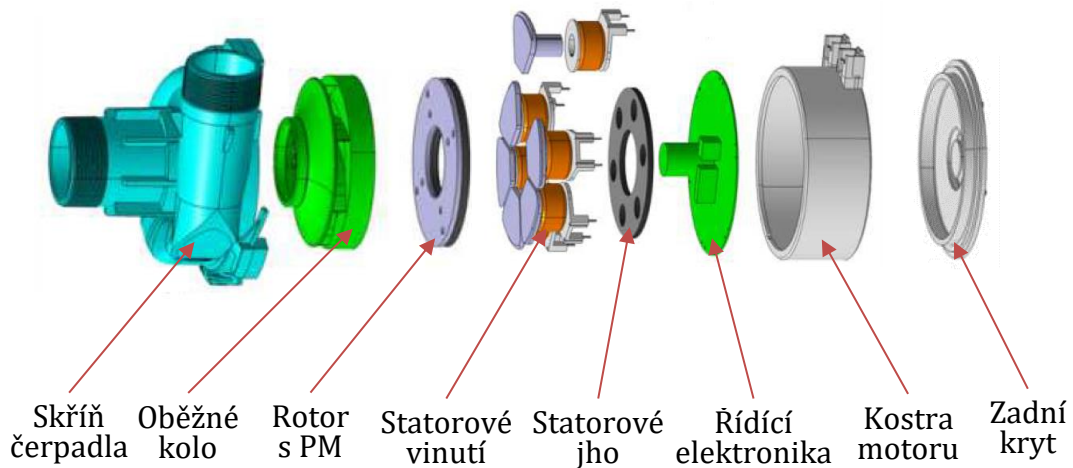
Oběžné kolo je poháněno oboustrannou strukturou s vnitřním rotorem a bezželeznými statory. Na obvodu rotoru s permanentními magnety se nachází samotné oběžné kolo. Stabilita v pěti stupních volnosti zajišťuje hydrodynamické ložisko. V porovnání s odstředivým oběžným kolem má vírový typ lineární charakteristiky velikosti průtoku a tlaku. Díky tomu lze dokonale kontrolovat a regulovat celkový průtok prostřednictvím otáček motoru. Pro dosažení co nejmenší axiální délky bylo vinutí na obou statorech provedeno formou spirál na plošném spoji (viz Obr. 12 a)). Na Obr. 13 se nachází řez integrovaným čerpadlem.



Obr. 13: Řez integrovaným čerpadlem s axiálním motorem (upraveno z [7])

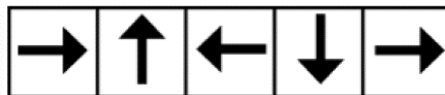
### 3.2.3 Přímý pohon odstředivého čerpadla

Autoři v literatuře [8] představili konstrukci odstředivého čerpadla poháněného axiálním motorem s jednostrannou strukturou. Celkový pohled na sestavu čerpadla je zobrazen na Obr. 14.



**Obr. 14: Sestava odstředivého čerpadla představená v literatuře [8]**

Stator tvoří koncentrické cívky navinuté na nemagnetickou kostru. Do každé cívkové kostry je vložen statorový zub s pólovým nástavcem z magneticky měkké oceli. Jednotlivé statorové zuby po vložení do diskového jha vytváří celistvou soustavu. Tato koncepce umožňuje snadné navinutí cívek před samotným vložením do statoru. Snížení celkové hmotnosti se dosáhlo připevněním rotorového disku přímo na oběžné kolo.



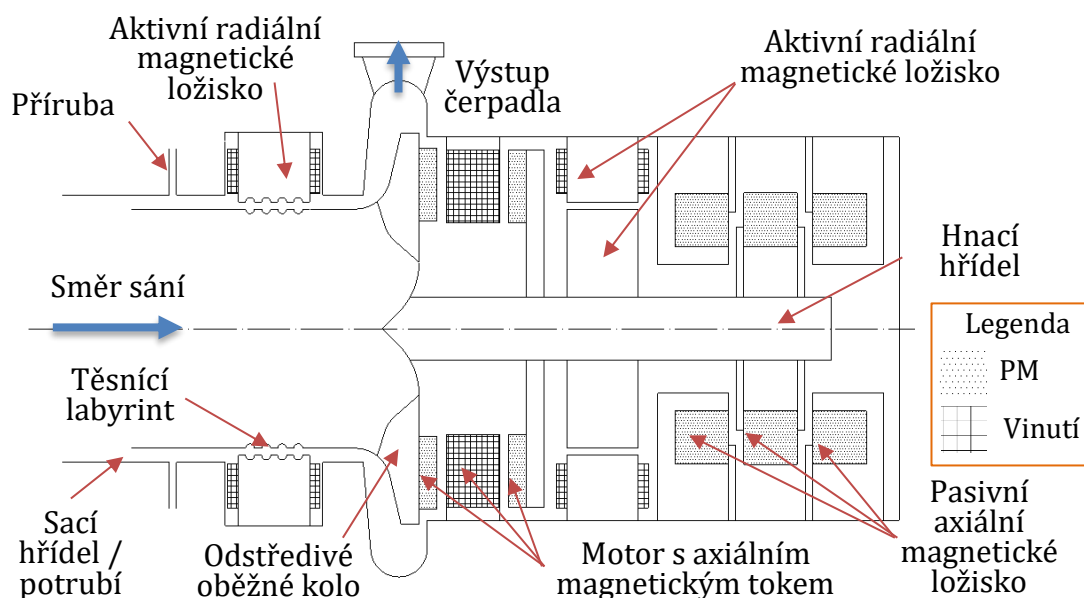
**Obr. 15: Halbachovo uspořádání permanentních magnetů (převzato z [14])**

Rotorové permanentní magnety zaujímají tzv. uspořádání do segmentové Halbachovy řady (viz Obr. 15). Základní segmentová řada obsahuje pětici permanentních magnetů. Polarizace sousedních magnetů je úhlově otočena o  $90^\circ$ , současně každý třetí magnet v pořadí má polarizaci pootočenou o úhel  $180^\circ$ . Magnetizace magnetů se diskrétně otáčí po  $90^\circ$  ve směru nebo proti směru hodinových ručiček. Takovéto uspořádání vytváří ve vzduchové mezeře téměř sinusově rozložené magnetické pole (nejedná se ideální Halbachovu řadu). Využitím Halbachovy řady bylo docíleno rovněž snížení celkové hmotnosti rotoru oproti běžnému uspořádání. Ideální Halbachovo uspořádání na rozdíl od segmentové řady nabývá spojitě proměnné magnetizace. Ideálního rozložení je možné dosáhnout pouze u celistvých materiálů [48].

## 4 BEZUCPÁVKOVÉ ODSTŘEDIVÉ ČERPADLO

Základní myšlenkou bezucpávkových čerpadel je naprosté vyloučení těsnících materiálů (gumových, silikonových atd.). Čerpadla s absencí ucpávek disponují naprostou těsností a zvýšenou odolností vůči agresivním látkám, současně prodlužují servisní intervaly a snižují celkové nároky na údržbu. Tyto vlastnosti předurčují bezucpávková čerpadla pro využití v potravinářském, farmaceutickém či chemickém průmyslu. Samotná popularita vzrostla zejména ve spojení s krevními pumpami, které se stávají významnou součástí léčby pacientů se srdečním selháním [6][15][16][31].

Čerpadla odstředivého typu (také označovaná jako hydrodynamické pumpy) jsou v současnosti nejběžněji používanou konstrukcí. Vynikají zejména spolehlivostí, malými nároky na údržbu, životností a vysokým průtokem. Běžně nachází využití v podobě bazénových, zahradních či hasících čerpadel. V oblasti průmyslu se využívají pro čerpání kapalin s nízkou a střední viskozitou nebo pro přečerpávání zkapalněných plynů (např. LPG). Naopak nelze čerpat pastovité či sypké materiály. Odstředivá čerpadla negenerují konstantní tlak. Není možné přesně určit objem kapaliny připadající na jednu otáčku oběžného kola. Při nečinnosti čerpadla může kapalina oběma směry volně procházet, neboť lopatky plně nepřehrazují prostor mezi sacím a výstupním potrubím [15][16].



Obr. 16: Zjednodušený náčrt bezucpávkového čerpadla (upraveno z [6])

### 4.1 Základní uspořádání

Samotné bezucpávkové čerpadlo je řešeno v rámci projektu pro „Výzkumné centrum speciálních rotačních strojů“. Celý koncept vychází z patentu [3]

vytvořeném na Odboru Fluidního inženýrství Viktora Kaplana Energetického ústavu FSI VUT v Brně. Schématické uspořádání systému je zobrazeno na Obr. 16. Základem čerpadla je sací a výstupní potrubí, mezi které je vsazeno odstředivé oběžné kolo. Na společné hřídeli se nachází hnací motor s trojicí magnetických ložisek. V literatuře [6] lze, kromě uvedené varianty, dohledat také další možná provedení čerpadel nevyužívající ucpávky. Komerčně vyráběná bezucpávková čerpadla přenáší mechanický výkon z motoru k oběžnému kolu prostřednictvím magnetické spojky [15][31]. Díky implementovanému motoru uvnitř čerpadlové skříně v patentu [3] byla tato magnetická spojka zcela odstraněna.

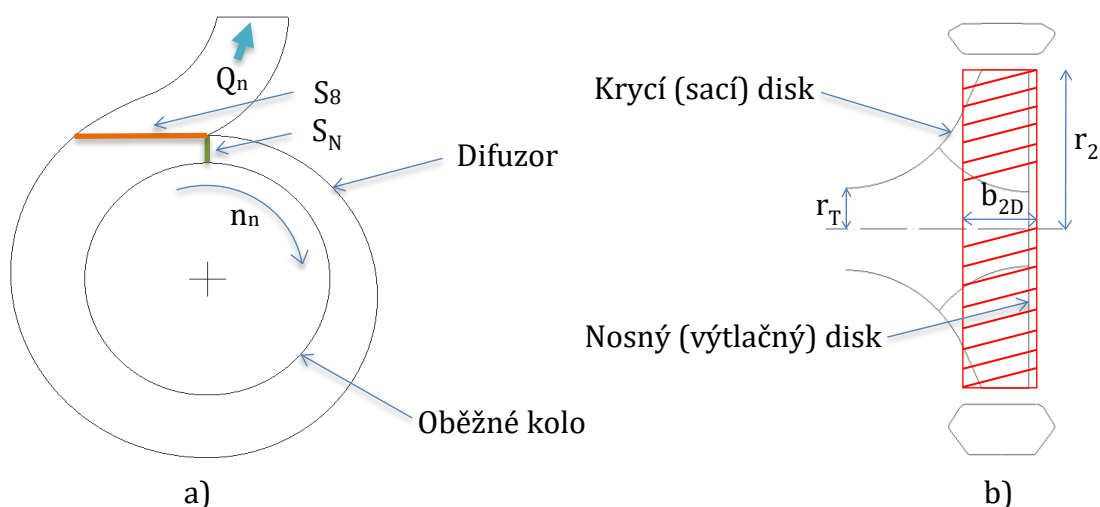
## 4.2 Parametry oběžného kola

Na Obr. 17 je zobrazen zjednodušený náčrtek odstředivého čerpadla. Samotné oběžné kolo se skládá z krycího (sacího) a nosného (výtláčného) disku. Specifické parametry čerpadla (vyznačené na Obr. 17) se nachází v Tab. 2.

Tab. 2: Parametry oběžného kola odstředivého čerpadla

| $Q_n$<br>[l·s <sup>-1</sup> ] | $n_n$<br>[ot·min <sup>-1</sup> ] | $r_2$<br>[mm] | $r_T$<br>[mm] | $b_{2D}$<br>[mm] | $S_N$<br>[mm <sup>2</sup> ] | $S_8$<br>[mm <sup>2</sup> ] | $D_{ki}$<br>[mm] |
|-------------------------------|----------------------------------|---------------|---------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------|
| 11                            | 1450                             | 77,5          | 31,0          | 26,0             | 390                         | 2123                        | 170              |

Kde  $Q_n$  značí jmenovitý průtok čerpadla,  $n_n$  je počet otáček oběžného kola za minutu,  $S_8$  udává plochu v místě vyústění čerpadla,  $S_N$  je plocha v nejužším místě mezi oběžným kolem a stěnou difuzoru,  $r_2$  je výstupní poloměr nosného disku,  $r_T$  udává poloměr vstupního krycího disku,  $r_n$  je vstupní poloměr nosného disku,  $b_{2d}$  vyjadřuje šířku oběžného kola. Autentická fotografie statoru a oběžného kola odstředivého čerpadla z patentu [3] se nachází na Obr. 20.



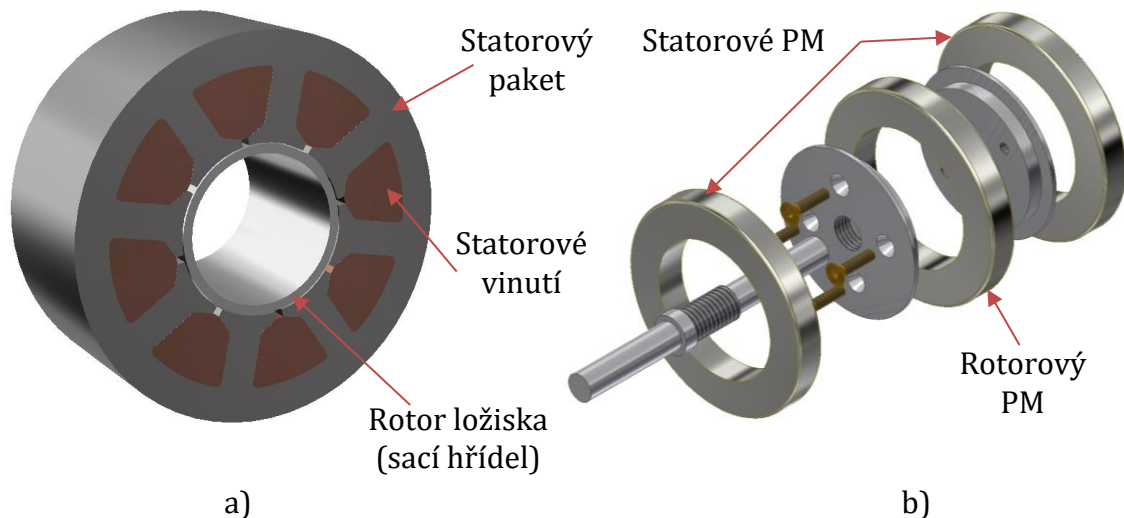
Obr. 17: Náčrtek odstředivého čerpadla: a) čelní pohled, b) pohled v řezu

### 4.3 Ložiskový systém

Uložení soustavy oběžného kola s motorem nebude provedeno běžným způsobem (mechanickými nebo hydraulickými ložisky). Danou funkci bude zastávat magnetický systém. Zamezí se tak přenášení vibrací mezi rotorem a státorem čerpadla. Během chodu se zajistí stabilita rotoru čerpadla (v pěti stupních volnosti) dvojicí radiálních ložisek společně s ložiskem axiálním. Samotným návrhem magnetického ložiskového systému pro bezucpávkové čerpadlo se zabýval zdroj [13].

Aktivní radiální ložiska jsou osmipólové konstrukce (viz Obr. 18 a)). Velikost radiální vzduchové mezery 0,6 mm je dána těsnícím labyrintem. Ten tvoří celkem osm kruhových spár o průměru 3 mm (viz Obr. 19). Těsnící funkce je založena na vzniku turbulentního proudění, které je dáno výskytem oblastí s nižším (kruhové spáry s průměrem 3 mm) a vyšším (vzduchová mezera s velikostí 0,6 mm) tlakem. Účelem labyrintu je zamezit zpětnému vnikání čerpané kapaliny z výstupu čerpadla do sacího potrubí.

Těsnící labyrint obsahuje pouze radiální ložisko umístěné na **sací** hřídeli (na Obr. 16 vlevo). Poměrně malá tloušťka stěny (4 mm) sací hřídele výrazně komplikovala samotný návrh ložiska (tvarem rotoru je pouze válcové mezikružší). Aktivní ložisko umístěné na **hnací** hřídeli (na Obr. 16 vpravo) těsnící labyrint neobsahuje, tvarem rotoru je naopak plný válec. Řízením polohy magnetických ložisek se zabývala práce [32].

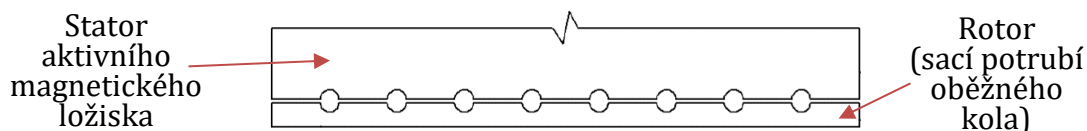


Obr. 18: Magnetické ložisko: a) aktivní radiální (řez), b) pasivní axiální

Vedle radiálních sil se současně musí kompenzovat i síly axiální. Tuto funkci obstarává axiální pasivní magnetické ložisko. Základem jeho konstrukce je trojice prstencových permanentních magnetů polarizovaných v axiálním směru (viz Obr. 18 b)). Krajní statorové magnety musí být orientovány takovým způsobem, aby docházelo ke generaci odpuzivé síly na magnet umístěný na rotoru. Nepůsobí-li vnější axiální síla, rotor ložiska se ustaví do takové polohy, aby

výslednice sil od obou permanentních magnetů byla nulová. Ideální středové polohy rotoru (velikost axiálních vzduchových mezer je shodná) lze dosáhnout za předpokladu totožných vlastností statorových magnetů a dokonalé stability v radiálním směru.

Pro dosažení dostatečné tuhosti axiálního ložiska je nutné vyrobít hřídel z magneticky nevodivého materiálu (např. z nerezové oceli) zamezující uzavírání magnetického toku.



Obr. 19: Těsnicí labyrint aktivního magnetického ložiska

## 4.4 Pohon čerpadla

Čerpadlo je poháněno motorem umístěným na hnací hřídeli mezi oběžným kolem a radiálním ložiskem. Součástí patentu [3] je požadavek na použití diskového motoru. Samotný návrh motoru s axiálním magnetickým tokem přes vzduchovou mezeru je hlavním cílem předkládané diplomové práce.

Pro snížení hmotnosti a rozměrů v axiálním směru je nosný disk oběžného kola využit jako rotorové jeho permanentních magnetů motoru (viz Obr. 16). Čerpaná kapalina, vyplňující vnitřní prostor čerpadla, bude současně sloužit k odvodu tepla z motoru a aktivních ložisek. Podrobnějším popisem uspořádání a samotným návrhem axiálního motoru se zabývá kapitola 5. Ovlivňování magnetických ložisek s axiálním motorem není v rámci této práce uvažováno.



Obr. 20: Fotografie oběžného kola a statoru bezucpávkového čerpadla

## 5 NÁVRH MOTORU S AXIÁLNÍM TOKEM

Před započítím vlastního návrhu pohonu bylo nejprve zapotřebí zvolit vhodnou konstrukci motoru. Použití běžného stroje s radiálním magnetickým tokem by nepřineslo velké výhody vzhledem k celkové koncepci samotného čerpadla, zejména z pohledu využití prostorového potenciálu čerpadlové skříně. Vhodným konstrukčním uspořádáním jsou axiální stroje, kterými je možné daný prostor maximálně využít. Požadavek na diskový motor vychází rovněž z patentu bezucpávkového čerpadla [3].

V literární rešerši (viz kapitola 3) je uvedena řada konstrukčních topologií. Axiální stroje jsou obecně stroji diskovými, proto je možné využít pro rotor stroje nosný disk oběžného kola. Jednostranná konstrukce má nevýhody zmíněné v kapitole 3.1.1. Oboustranná konstrukce tyto nevýhody eliminuje. S ohledem na využití oběžného kola bylo zvoleno oboustranné uspořádání s vnitřním statorem.

Zdroj [33] srovnává variantu stroje se železným a bezželezným satorovým jádrem (coreless). Na základě uvedených výsledků s možným dosáhnutím vyšší účinnosti byla zvolena varianta bezželezného satoru. Dalším aspektem byla celková jednoduchost provedení a s tím spojená snazší výroba oproti železnému jádru. Pro správnou funkci motoru s bezželezným statorem musí rotorové permanentní magnety zaujímat orientaci ve smyslu SJ. Tato orientace zaručí uzavírání magnetického toku přes obě rotorová jha (viz Obr. 8 d)).

Vinutí satoru bylo zvoleno rozložené s lichoběžníkovými cívkami (viz Obr. 66). Cívky budou navinuty smaltovaným vodičem kruhového průřezu. Díky rozloženému vinutí je možné získat vyšší hodnotu indukovaného napětí oproti vinutí se soustřednými cívkami (soustředné cívky zaujímají menší plochu oproti cívkám rozloženého vinutí).

Předběžný návrh stroje se opíral o soubor analytických vztahů z kapitoly 5.2. Z navazujícího textu v následujících kapitolách vyplývá, že samotné analytické vztahy pro návrh bezželezného stroje nepostačují. V opačném případě by vyrobený stroj nedosahoval žádaných parametrů.

Pro dosažení maximální efektivity a zamezení chyb při výpočtu rovnic z kapitol 5.2.1 až 5.2.5 bylo využito software Matlab. Zdrojový kód byl částečně převzat z literatury [1]. Zápis rovnic byl náležitě upraven tak, aby celkový výpočet korespondoval s výkonovými toky v motoru.

### 5.1 Požadované parametry pohonu

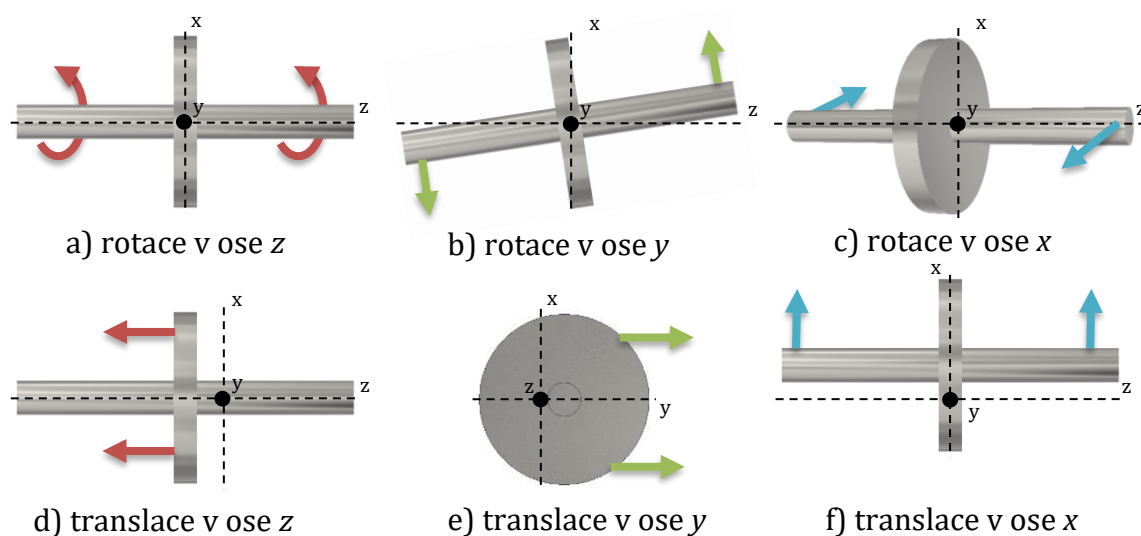
Po zvolení vhodné konstrukce pohonu následovalo stanovení výchozích parametrů navrhovaného motoru. Jmenovité otáčky  $n_n$  vychází z nominálních otáček oběžného kola  $1450 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Příkon oběžného kola při nominálních otáčkách je  $490 \text{ W}$ . Příkon

oběžného kola odpovídá požadovanému mechanickému výkonu motoru  $P_2$ . Maximální moment kladený oběžným kolem  $M_{max}$  byl dle konzultace na FSI VUT v Brně určen na hodnotu 3,5 Nm. Maximální provozní otáčky  $n_{max}$  byly stanoveny na hodnotu 1500 ot·min<sup>-1</sup>.

Statorové vinutí motoru bude třífázové ( $m_1 = 3$ ) a zapojené do hvězdy. Napájení je uvažováno prostřednictvím třífázového měniče připojeného na jednofázovou síť 230 V. Maximální velikost výstupního sdruženého napětí  $U_{smax}$  měniče bude rovněž 230 V. Fázová hodnota napětí  $U_f$  vůči středu hvězdy je uvažována v rozmezí 125 V až 130 V.

Maximální vnější průměr rotorů  $D_o$  148 mm je dán využitelným průměrem oběžného kola pro umístění permanentních magnetů.

Literární zdroj [34] porovnává dvojici obdobných strojů s odlišným počtem pólů. Ve zkoumaných bodech dosahoval lepších parametrů stroj vícepólový: menší kolísání synchronních indukčností v osách dq, vyšší točivý moment, nižší reluktanční moment, nižší vibrace a zvlnění momentu. S ohledem na omezený vnější průměr nebylo možné zvolit příliš velký počet pólů. Na základě konzultace s vedoucím práce byla zvolena 8-pólová konfigurace ( $2p = 8$ ).



**Obr. 21: Příklady pohybu tělesa v šesti stupních volnosti**

Rozměry axiální mechanické vzduchové mezery motoru  $h_g$  se odvíjí od možného pohybu rotoru čerpadla v magnetickém ložiskovém systému. Při nevhodně zvolené axiální mezeře by mohlo dojít ke kontaktu statoru s rotorem (nebezpečí poškození permanentních magnetů případně izolace statorového vinutí). Obr. 21 vyznačuje šest možných stupňů volnosti rotoru. Trojice je povahy rotační – a), b) a c). Ostatní d), e) a f) jsou charakteru translačního.

Nepříznivými stupni volnosti, z pohledu vzájemného dotyku mezi statorem a rotorem, jsou varianty b), c), d). Mezní vychýlení axiálního ložiska je dle [13] 2 mm (posun z rovnovážné polohy v ose z). Současně může nastat náklon rotoru

v radiálních ložiscích (rotace v ose  $y$  a  $x$ ). Velikost mechanické vzduchové mezery  $h_g$  byla s ohledem na zmíněné podmínky zvolena 4 mm. Souhrn požadovaných parametrů motoru se nachází v Tab. 3.

**Tab. 3: Souhrn požadovaných parametrů pohonu**

| $P_2$<br>[W] | $2p$<br>[-] | $m_1$<br>[-] | $U_s$<br>[V] | $n_n$<br>[ot·min <sup>-1</sup> ] | $n_{max}$<br>[ot·min <sup>-1</sup> ] | $M_{max}$<br>[N·m] | $D_o$<br>[mm] | $h_g$<br>[mm] |
|--------------|-------------|--------------|--------------|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------|---------------|---------------|
| 490          | 8           | 3            | 230          | 1450                             | 1500                                 | 3,5                | 148           | 4             |

## 5.2 Analytický výpočet

Dále byly voleny parametry pro analytický výpočet. Účinnost běžných bezželezných axiálních motorů se dle vytvořené Tab. 4 pohybuje v rozmezí 91,0 % až 97,5 %. Na účinnosti stroje závisí hodnota statorového proudu a vnější průměr stroje. V daném návrhu je vnější průměr pevně dán nosným diskem. Vzhledem ke zvýšeným ztrátám při pohybu rotorů v kapalině byl odhad účinnosti stroje  $\eta$  stanoven na 85 %.

**Tab. 4: Vybrané axiální motory s bezželezným statorem**

| Zdroj:                                   | [35] | [36]  | [37]  | [38]  | [39]  | [40] |
|------------------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| Jmenovitý výkon [kW]                     | 0,25 | 10,00 | 10,50 | 0,06  | 25,00 | 1,80 |
| Jmenovité otáčky [ot·min <sup>-1</sup> ] | 375  | 750   | 600   | 30000 | 1100  | 1060 |
| Počet pólů [-]                           | 16   | 16    | 16    | 4     | 16    | 40   |
| Účinnost [%]                             | 92,0 | 92,5  | 91,0  | 96,0  | 93,0  | 97,5 |

Počet cívkových stran na pól a fázi  $q_1$  má shodný význam jako počet drážek na pól a fázi u běžných strojů s radiálním tokem. Pro značně omezený prostor a snadnou proveditelnost vinutí byla zvolena jedna cívková strana na pól a fázi.

Obvykle není možné u bezželezných strojů dosáhnout hodnoty magnetické indukce jako u konstrukcí s železným jádrem. To je zejména dáno rozměrem axiální vzduchové mezery (součet dvou mechanických vzduchových mezer spolu s celkovou šířkou statorového vinutí). Je vhodné předpokládat nižší velikost indukce, proto na základě konzultace s vedoucím práce byla zvolena střední magnetická indukce ve vinutí  $B_{\delta str}$  pouze 250 mT.

Napájení a řízení vlastního motoru bude prostřednictvím frekvenčního měniče, který je schopen zajistit výsledný účiník  $\cos \varphi$  roven jedné (tzn. odebírán bude pouze činný výkon).

Hodnota poměrového koeficientu  $k_d$  pro výpočet vnitřního průměru byla zvolena na základě doporučení v literatuře [2]. Dále koeficient poklesu napětí  $k_{AU}$  se volí v závislosti na tom, zda stroj pracuje v motorickém ( $k_{AU} < 1$ ) či generátorickém ( $k_{AU} > 1$ ) režimu. S pomocí literatury [2] byla jeho hodnota odhadnuta na 0,95. Hodnota činitele plnění mědi  $k_{cu}$  byla volena na základě doporučení v literatuře [2].

Čerpaná kapalina bude plnit funkci chladicího média, přesto proudová hustota  $J_{max}$  ve vodičích statoru byla zvolena s ohledem na účinnost stroje a mechanickou odolnost vodiče.

Velikost pólového krytí permanentních magnetů  $\alpha_{PM}$  byla stanovena dle doporučení v literatuře [2] na hodnotu  $\pi/2$ . Tato hodnota se odvíjí od předpokládaného sinusového průběhu magnetické indukce ve vinutí statoru.

Teplota navrhovaného motoru bude při provozu závislá na teplotě čerpané kapaliny. Z pohledu dimenzování je uvažována teplota vinutí  $v_w$  a permanentních magnetů  $v_{PM}$  40 °C. Pro dostatečný pohyb a obměnu kapaliny v prostoru za nosným diskem bude kostra čerpadla vybavena pomocnou zpětnou hadicí připojenou na výstup z čerpadla. Parametry pro analytický návrh jsou shrnuty do Tab. 5.

**Tab. 5: Souhrn hodnot pro analytický výpočet v kapitole 5.2**

| $\eta$<br>[%] | $B_{\delta str}$<br>[mT] | $\cos \varphi$<br>[-] | $q_1$<br>[-] | $\alpha_{PM}$<br>[-] | $h_r$<br>[mm] | $k_d$<br>[-] | $k_{\Delta U}$<br>[-] | $k_{cu}$<br>[-] | $J_{max}$<br>[A·mm <sup>-1</sup> ] | $v_w$<br>[°C] | $v_{PM}$<br>[°C] |
|---------------|--------------------------|-----------------------|--------------|----------------------|---------------|--------------|-----------------------|-----------------|------------------------------------|---------------|------------------|
| 85            | 250                      | 1                     | 1            | 0,637<br>(0,756)     | 10            | $1/\sqrt{3}$ | 0,95                  | 0,6             | 4                                  | 40            | 40               |

pozn.: hodnoty uvedené v závorkách byly upraveny na základě výsledků z MKP

Jednotlivé výpočetní vztahy použité v kapitole 5.2 (včetně přílohy 1) byly převzaty z literatury [2], současně bylo využito informací uvedených ve zdroji [1]. Při návrhu motoru s axiálním tokem je možné vycházet z definice účinnosti dle rovnice (5.1). Ta je dána podílem mechanického výkonu oběžného kola  $P_2$  a elektrického příkonu  $P_1$ .

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{el}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{mech}}{m_1 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi} \quad (5.1)$$

Velikost proudu procházejícího jednou fází statoru  $I_f$  se získá úpravou rovnice (5.1) na rovnici (5.2) a následným dosazením hodnot z Tab. 3 a Tab. 5.

$$I_f = \frac{P_2}{m_1 \cdot U_f \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \quad (5.2)$$

### 5.2.1 Rozměry a parametry vinutí statoru

Cílem této podkapitoly bylo určit základní rozměry a parametry statorového vinutí. Získané hodnoty sloužily jako vstupní parametry pro analýzu a ověření metodou konečných prvků.

Určovanými parametry byly: celkový počet závitů v jedné fázi  $N_1$ , celkový počet závitů v cívce  $N_c$ , počet paralelních vodičů  $a_w$ , průměr vodiče  $d_{cu}$ , tloušťka vinutí  $h_c$  a vnitřní průměr motoru  $D_i$ . Výsledné hodnoty jednotlivých parametrů statorového vinutí jsou uvedeny v Tab. 6. V rámci výpočtů vinutí byla určena současně i hodnota jmenovitého momentu  $M_n$  spolu se jmenovitou  $I_{fn}$  a maximální hodnotou proudu  $I_{fmax}$ . Soubor rovnic použitý pro výpočet je součástí přílohy 1.

Tab. 6: Parametry satorového vinutí

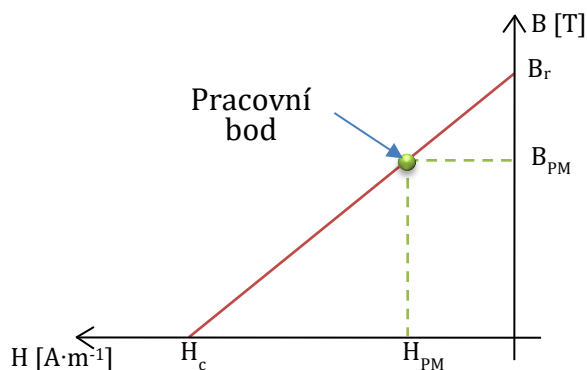
| $N_1$                                                           | $N_c$        | $a_w$ | $d_{cu}$ | $h_c$ | $D_i$ | $I_{fn}$ | $M_n$ | $I_{fmax}$ |
|-----------------------------------------------------------------|--------------|-------|----------|-------|-------|----------|-------|------------|
| [-]                                                             | [-]          | [-]   | [mm]     | [mm]  | [mm]  | [A]      | [N·m] | [A]        |
| 792<br>(644)                                                    | 198<br>(161) | 2     | 0,50     | 16    | 85,4  | 1,5      | 3,2   | 1,6        |
| pozn.: hodnoty uvedené v závorkách byly upraveny na základě MKP |              |       |          |       |       |          |       |            |

### 5.2.2 Návrh permanentních magnetů

Kritickým bodem návrhu strojů s bezželezným satorovým jádrem je samotný návrh permanentních magnetů. Bez dodatečné úpravy analyticky vypočtených rozměrů nelze dosáhnout požadované střední magnetické indukce ve vinutí  $B_{\delta str}$ .

Standardní návrh pomocí analytických vztahů zanedbává rozptylové magnetické toky. V případě strojů s železným jádrem nepředstavuje toto zanedbání velkou odchylku (délka vzduchové mezery je minimální). V případě bezželezných strojů dosahují rozptylové toky značných hodnot a nelze je jednoduše zanedbat. Do velikosti vzduchové mezery je nutné zahrnout součet dvojice mechanických mezer společně s odpovídající šířkou satorového vinutí.

Návrh permanentních magnetů je možné provést následující způsobem. Za pomoci analytických vztahů předběžně určit tloušťku permanentních magnetů. V dalším kroku vytvořit model stroje pro aplikaci metody konečných prvků. Na základě výsledků upravit tloušťku magnetů tak, aby střední hodnota magnetické indukce ve vinutí souhlasila s hodnotou v Tab. 5.



Obr. 22: Pracovní kvadrant permanentního magnetu

Běžný postup je založen na řešení magnetického obvodu a následném nalezení pracovního bodu v BH charakteristice permanentního magnetu (Obr. 22). Demagnetizační křivka definuje dva základní parametry, které jsou pro daný typ magnetu specifické. Křivka v místě průchodu osou magnetické indukce  $B$  vynáší hodnotu takzvané remanentní indukce  $B_r$ . Naopak v místě průchodu osou magnetické intenzity  $H$  křivka určuje takzvanou koercitivní sílu  $H_c$ . Koercitivita udává odolnost permanentního magnetu proti demagnetizaci. Pracovní bod

permanentního magnetu je určen magnetickou indukcí  $B_{PM}$  a magnetickou intenzitou permanentního magnetu  $H_{PM}$ .

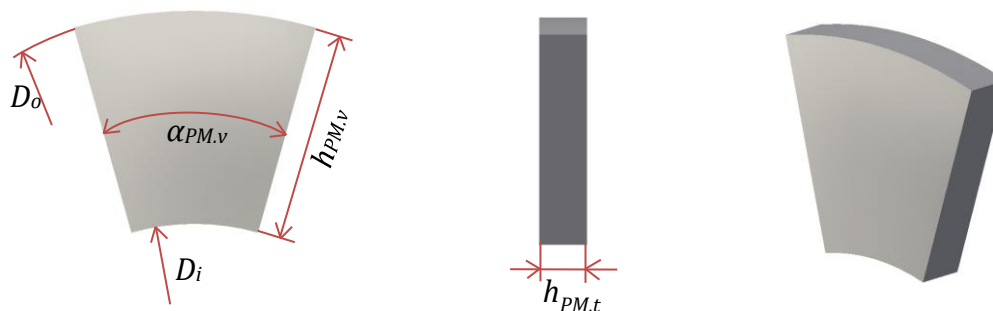
Vzhledem k uvažované vyšší teplotě prostředí je vhodné hodnotu remanentní indukce a koercitivní síly přepočítat. Obecně s rostoucí teplotou dochází k poklesu hodnoty obou veličin (viz příloha 4). Výrobci zpravidla uvádí vlastnosti při 20 °C. Pro přepočet remanentní indukce lze využít vztahu (5.3).

$$B_r = B_{r20} \cdot \left[ 1 + \frac{\alpha_B}{100} \cdot (\vartheta_{PM} - 20) \right] \quad (5.3)$$

Kde  $B_{r20}$  je remanentní indukce při 20 °C,  $\alpha_B$  je koeficient změny remanentní indukce s teplotou,  $\vartheta_{PM}$  značí teplotu magnetů. V případě korekce koercitivní síly platí rovnice (5.4).

$$H_c = H_{c20} \cdot \left[ 1 + \frac{\alpha_H}{100} \cdot (\vartheta_{PM} - 20) \right] \quad (5.4)$$

Kde  $H_{r20}$  je koercitivní síla při 20 °C,  $\alpha_H$  je koeficient změny koercitivní síly s teplotou. Hodnota koeficientů  $\alpha_B$  a  $\alpha_H$  je vždy menší než jedna.



**Obr. 23: Náčrtek s rozměry rotorového permanentního magnetu**

Cílem při výběru permanentních magnetů bylo dosažení požadované indukce ve vinutí při minimální tloušťce. Nutné bylo rovněž uvažovat i demagnetizační účinek od magnetického pole vinutí. Dalším kritériem byla teplotní třída s odpovídající pracovní teplotou. Požadavky splnily permanentní magnety ve složení neodym železo bór typu N52M. Pro teplotní třídu M je udávaná trvalá pracovní teplota 100 °C [23]. Charakteristické parametry pro typ N52M se nachází v Tab. 7. Souhrn rozměrů rotorových magnetů se rovněž nachází v Tab. 7. Na Obr. 23 jsou jednotlivé rozměry permanentního magnetu znázorněny graficky. Rovnice použité pro výpočet hodnot v Tab. 7 jsou součástí přílohy 1.

**Tab. 7: Souhrn rozměrů permanentních magnetů a vlastností pro N52M [23]**

| $B_{r20}$<br>[T]                                                         | $H_{c20}$<br>[kA·m <sup>-1</sup> ] | $\alpha_B$<br>[%] | $\alpha_H$<br>[%] | $\mu_{rPM}$<br>[-] | $h_{PM,t}$<br>[mm] | $h_{PM,v}$<br>[mm] | $\alpha_{PM,v}$<br>[°] |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------|
| 1,45                                                                     | 1054                               | -0,120            | -0,675            | 1,09               | 5,7<br>(8,0)       | 31,3               | 31,5<br>(34,0)         |
| pozn.: hodnoty uvedené v závorkách byly upraveny na základě MKP a výroby |                                    |                   |                   |                    |                    |                    |                        |

### 5.2.3 Náhradní parametry motoru

Náhradní parametry stroje mohou sloužit pro vytvoření matematického modelu případně samotného řízení motoru. Určovanými parametry byly: odpor fáze statoru  $R_s$ , indukčnost v ose  $d$   $L_d$  a indukčnost v ose  $q$   $L_q$ .

Velikosti jednotlivých náhradních parametrů motoru jsou uvedeny v Tab. 8. Pro samotný výpočet bylo využito analytických vztahů (31) až (50), které jsou součástí přílohy 1.

Tab. 8: Náhradní parametry motoru

| $R_s$<br>[ $\Omega$ ]                                  | $L_d$<br>[mH] | $L_q$<br>[mH] |
|--------------------------------------------------------|---------------|---------------|
| 5,46                                                   | 14,5          | 14,1          |
| pozn.: určováno při $h_{PM,t}$ 8 mm a $N_c$ 161 závitů |               |               |

### 5.2.4 Hmotnosti a momenty setrvačnosti motoru

Cílem této podkapitoly bylo orientačně určit celkovou hmotnost motoru  $m$  společně s celkovým momentem setrvačnosti  $J_s$ . Současně byly určeny hmotnosti jednotlivých částí stroje: hmotnost vinutí  $m_{cu}$ , hmotnost permanentních magnetů  $m_{PM}$ , hmotnost rotorového disku  $m_{rj}$ , celková hmotnost rotoru  $m_r$ , hmotnost hřídele  $m_h$  a celková hmotnost motoru  $m$ .

Velikost momentu setrvačnosti společně s jednotlivými hmotnostmi se nachází v Tab. 8. Při výpočtu byla uvažována hřídel o průměru  $D_h$  20 mm a délce  $l_h$  200 mm. Použité výpočetní vztahy jsou součástí přílohy 1.

Tab. 9: Souhrn hmotností a momentu setrvačnosti motoru

| $m_{cu}$<br>[kg]                                                            | $m_{PM}$<br>[kg] | $m_{rj}$<br>[kg] | $m_r$<br>[kg] | $m_h$<br>[kg] | $m$<br>[kg] | $J_s$<br>[g·m <sup>2</sup> ] |
|-----------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------|---------------|---------------|-------------|------------------------------|
| 1,2                                                                         | 0,5              | 1,3              | 1,8           | 0,5           | 5,8         | 11                           |
| pozn.: určováno při $h_{PM,t}$ 8 mm, $\alpha_{PM}$ 0,756 a $N_c$ 161 závitů |                  |                  |               |               |             |                              |

### 5.2.5 Ztráty a účinnost motoru

V rámci této podkapitoly byly sledovány jednotlivé ztráty a účinnost motoru  $\eta_m$  (účinnost motoru bez ložisek) spolu s celkovou účinností soustavy  $\eta_c$  (účinnost motoru s magnetickými ložisky).

Vyčíslovány byly Joulovy ztráty ve vinutí  $\Delta P_{j1}$ , vířivé ztráty ve vodiči  $\Delta P_e$ , mechanické ztráty motoru  $\Delta P_{mech,M}$ , celkové ztráty motoru  $\Delta P_m$ , celkové ztráty soustavy motoru  $\Delta P_c$ . U strojů s bezželezným jádrem lze zanedbat ztráty v permanentních magnetech, neboť absencí drážek nedochází k změnám magnetické vodivosti. Mechanické ztráty magnetických ložisek  $\Delta P_{ložiska}$  způsobené

třením rotorů o kapalinu byly konzultovány na Odboru fluidního inženýrství VUT v Brně a stanoveny na velikost 15 W.

Pro získání korektní hodnoty celkové účinnosti soustavy  $\eta_c$  byl rovněž započten elektrický příkon aktivních ložisek  $P_{ložiska}$ . Příkon pro dvojici aktivních radiálních ložisek je na základě zdroje [13] uvažován 40 W.

Dále byl určován celkový příkon motoru  $P_{1m}$  a celkový příkon soustavy  $P_{1c}$ . Celková účinnost motoru  $\eta_m$  při zanedbání ztrát v permanentních magnetech je dána rovnicí (5.5). Účinnost systému  $\eta_c$  je dána rovnicí (5.6).

$$\eta_m = \frac{P_2}{P_{1m}} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{j1} + \Delta P_e + \Delta P_{mech,M}} \quad (5.5)$$

$$\eta_c = \frac{P_2}{P_{1c}} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{j1} + \Delta P_e + \Delta P_{mech,M} + \Delta P_{mech,L} + P_{ložiska}} \quad (5.6)$$

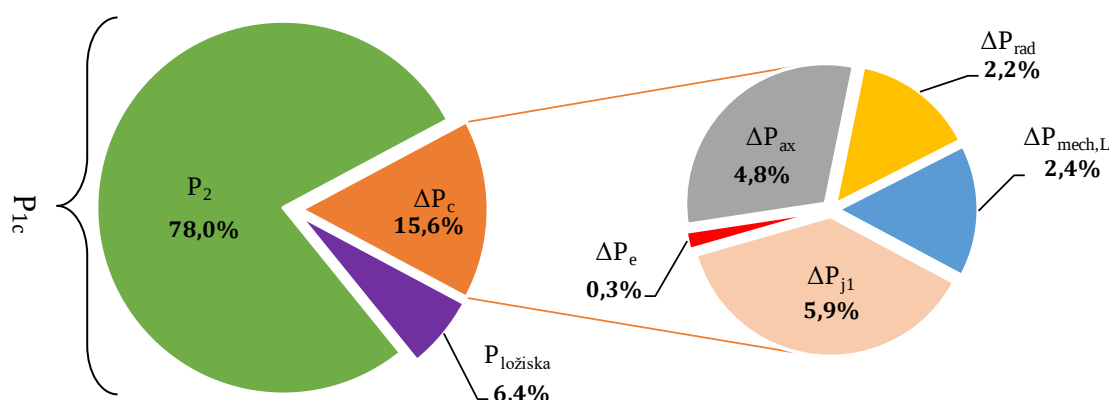
Jednotlivé ztráty, výkony, příkony spolu s účinnostmi ve jmenovitém pracovním bodě při činnosti motoru ve vodě se nachází v Tab. 10. Využité analytické vztahy s podrobným popisem se nachází v příloze 1.

**Tab. 10: Ztráty a účinnosti motoru ve jmenovitém bodě při chodu ve vodě**

| $\Delta P_{j1}$<br>[W]                                                      | $\Delta P_e$<br>[W] | $\Delta P_{mech,M}$<br>[W] | $\Delta P_{mech,L}$<br>[W] | $\Delta P_m$<br>[W] | $\Delta P_c$<br>[W] | $P_2$<br>[W] | $P_{ložiska}$<br>[W] | $P_{1m}$<br>[W] | $P_{1c}$<br>[W] | $\eta_m$<br>[%] | $\eta_c$<br>[%] |
|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|--------------|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 37                                                                          | 2                   | 44                         | 15                         | 83                  | 98                  | 490          | 40                   | 573             | 628             | 86              | 78              |
| pozn.: určováno při $h_{PM,t}$ 8 mm, $\alpha_{PM}$ 0,756 a $N_c$ 161 závitů |                     |                            |                            |                     |                     |              |                      |                 |                 |                 |                 |

Na Obr. 24 se nachází grafické znázornění procentuálního rozdělení celkového příkonu soustavy  $P_{1c}$ . Procentuální vyjádření jednotlivých výkonů koresponduje s Tab. 10. Mechanické ztráty motoru  $P_{mech,M}$  vznikající třením rotorů o vodu jsou rozděleny na ztráty axiální  $P_{ax}$  a radiální  $P_{rad}$  (viz příloha 1).

Výrazný podíl na celkových ztrátách tvoří ztráty mechanické. Způsobené rotací soustavy ve vodě.



**Obr. 24: Rozdělení příkonu soustavy motoru s magnetickými ložisky**

## 5.3 Statická analýza magnetického pole v motoru

Předběžně navržený motor byl podroben statické analýze magnetického pole v prostředí ANSYS Maxwell.

### 5.3.1 ANSYS Maxwell

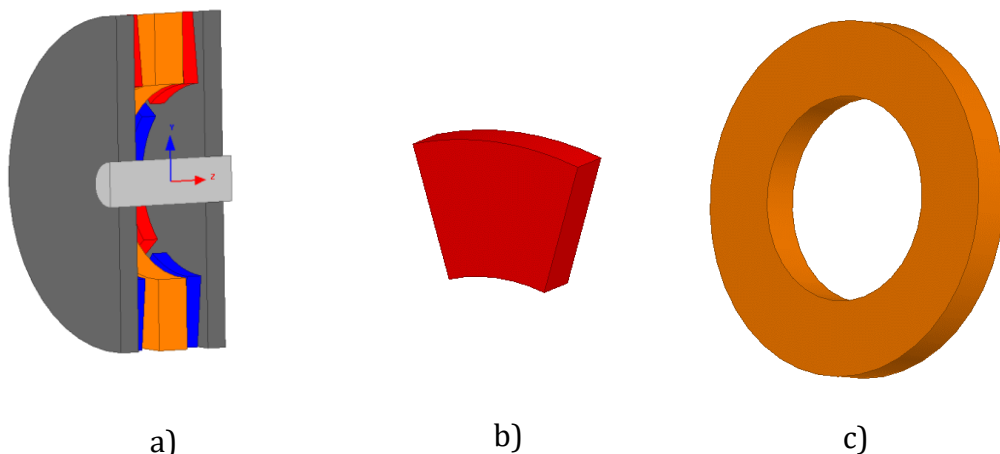
Software ANSYS Maxwell je velmi účinný nástroj v oblasti řešení nízkofrekvenčních magnetických polí. Program je založen na výpočtu diferenciálních Maxwellových rovnic. Řešená úloha je rozložena na řadu elementů, přičemž každý element je popsán svými specifickými vlastnostmi. Výpočet rovnic probíhá v jednotlivých uzlových bodech. Celkový soubor elementů (uzlů) je pak označován jako výpočetní síť případně „mesh“.

Software obsahuje inteligentní generátor výpočetní sítě. Na základě energií určí celkovou chybu, v problematických místech síť upraví a celý výpočet opakuje. Hustota výpočetní sítě lze funkcí „Assign Mesh Operation“ nastavit dle individuální potřeby (např. vzduchová mezera točivých strojů). Rozsáhlou databázi materiálových vlastností je možné měnit, eventuálně definovat materiál nový.

Součástí je dvojice expertních modulů sloužících pro návrh elektrických strojů: RMaxprt je účinný nástroj pro analýzu a navrhování strojů točivých, PExprt se naopak zabývá řešením strojů netočivých.

### 5.3.2 Vytvoření modelu

V rámci konečnoprvkové analýzy (MKP) není možné postihnout řešenou úlohu v každém svém detailu. Omezení představuje celkový počet elementů výpočetní sítě a celkový čas potřebný k samotnému výpočtu. Zjednodušení geometrie se běžně využívá také při řešení proudění, teplotních polí atd.



Obr. 25: a) řez – ½ axiálního motoru, b) PM, c) vinutí pro statickou analýzu

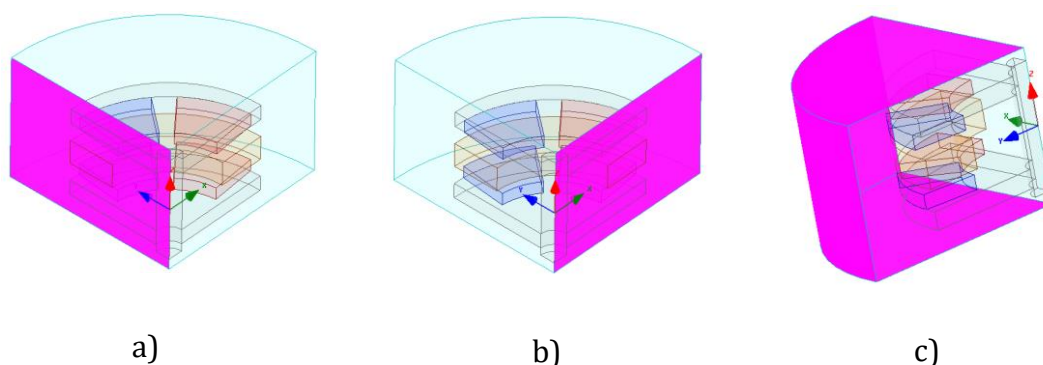
V kapitole 4.4 bylo zmíněno připevnění rotorových permanentních magnetů na nosný disk oběžného kola. V rámci modelu pro MKP analýzu nebude tato

skutečnost zahrnuta. Permanentní magnety obou rotorů se nachází na shodném nosiči. Tvarem nosičů je plný disk s vrtáním pro hřídel (viz Obr. 25 a)). Pracovní magnetický tok v axiálním stroji prochází pouze v horním průměru rotorového jha. Oblast spoje rotoru s hřídelí není z pohledu pracovního toku příliš důležitá (prochází zde pouze parazitní magnetický tok). Parazitní tok se uzavírá přes hřídel a rotorové disky. Provedené zjednodušení geometrie nebude mít zásadní vliv na výsledné hodnoty MKP výpočtů.

Konstrukci motoru neodpovídal žádný z předdefinovaných strojů v databázi parametrických modelů z RMxpřtu. Jednotlivé části modelu byly vytvářeny po částech za pomoci RMxpřtu a základních geometrických útvarů.

Pro vytvoření tvaru permanentních magnetů (Obr. 25 b)) byla z předdefinované knihovny využita položka „DiskPMCore“. V nabídce „Properties“ na záložce „InfoCore“ byla zapsána hodnota „1“. Výsledkem je vykreslení tvaru magnetu s požadovaným tvarem. Nabídka „Properties“ rovněž umožňuje nastavit pólové krytí, počet pólů, vnitřní a vnější průměr kruhové výseče a tloušťku permanentních magnetů. Barevné značení magnetů (červená a modrá) v Obr. 25 reprezentuje směr axiální magnetizace (shodně platí i v následujících kapitolách).

Rotorová jha byla vytvořena obdobným způsobem jako permanentní magnet s rozdílem, že do „InfoCore“ byla vložena hodnota „0“. Současně je opět možné vkládat parametry jako je tloušťka, vnější a vnitřní průměr disku. Celkový model motoru použitý pro statickou simulaci magnetického pole je zobrazen na Obr. 25 a).



**Obr. 26: a) „Master“, b) „Slave“, c) „Zero Tangential H Field“**

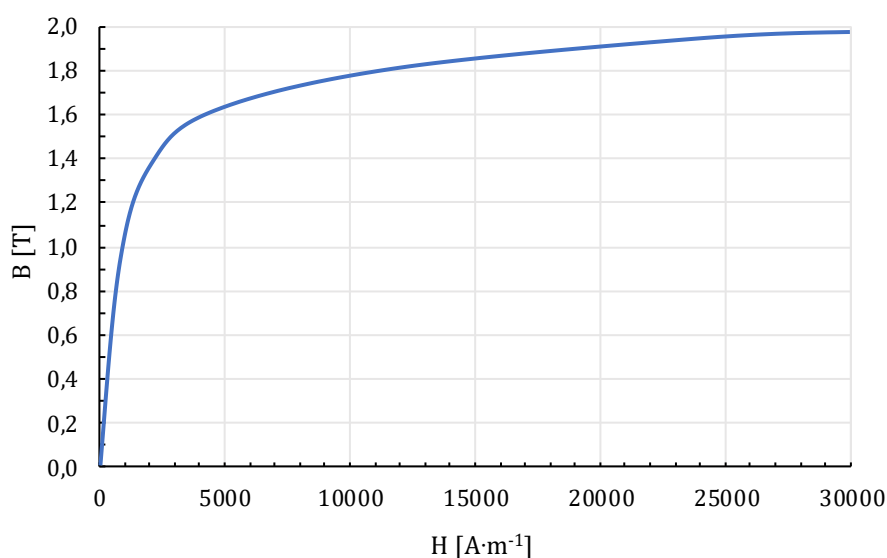
MKP výpočty probíhají pouze v omezeném objemu (v případě planární simulace v omezené ploše). Okolí modelu bylo ohraničeno objemem válce. Navrhovaný stroj obsahuje celkem čtyři pólové dvojice. Kompletní geometrii je možné interpretovat jako sestavu čtyř shodných výsečí. Pro snížení celkové výpočetní doby, byla analyzována pouze čtvrtinová výseč.

Validita výstupních hodnot je zajištěna aplikací dvojice okrajových podmínek na řezové roviny. Počáteční okrajovou podmínkou musí být vždy podmínka „Master“ (viz Obr. 26 a)). Zbývající řezová rovina je podřízena podmínce „Master“ a

nastaví se na typ „Slave“ (viz Obr. 26 b)). Zbylé plochy ohraničení (plášť, spodní a horní podstava válcové výseče) byly nastaveny na „Zero Tangential H Field“ (Obr. 26 c)).

### 5.3.3 Definice materiálů

Rotorové jho bude tvořit plný materiál. S ohledem na vyhovující vlastnosti byla pro rotorové disky společně s hřídelí zvolena konstrukční ocel „Steel\_1010“. Pro zamezení vzniku koroze při aplikaci uvnitř čerpadla bude povrch dílců pokoven ochrannou vrstvou. BH charakteristika konstrukční oceli je zobrazena na Obr. 27.



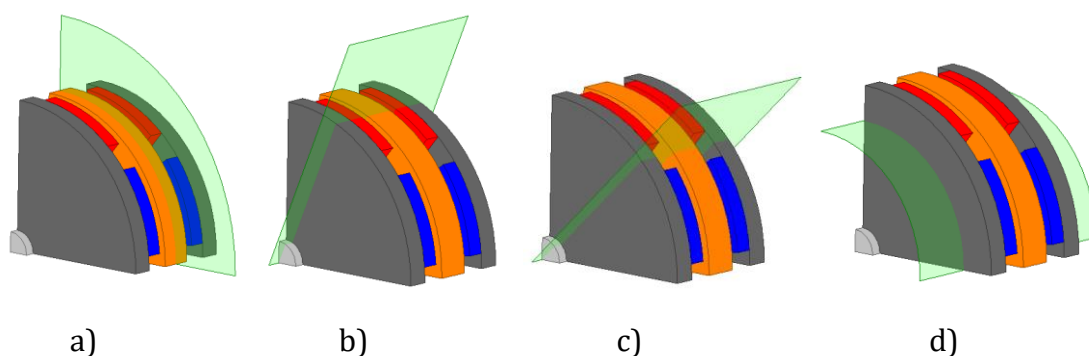
Obr. 27: Magnetizační charakteristika materiálu „steel\_1010“

Objem vinutí byl definován materiálem „copper“. Pro vnější prostředí bylo nastaveno „vacuum“. Pomocí dvojice nových materiálů, byly specifikovány vlastnosti permanentních magnetů typu N52M. Vstupní hodnotou byla remanentní indukce spolu s koercitivní silou z Tab. 7 (přepočítané na předpokládanou ustálenou teplotu 40 °C). Směr magnetizace se v případě kartézského souřadného systému definuje pomocí atributů: „X Component“, „Y Component“ a „Z Component“.

### 5.3.4 Plochy pro zobrazení magnetické indukce v motoru

Pro zobrazení rozložení magnetického pole uvnitř motoru byla v modelu vytvořena čtveřice ploch. Obr. 28 zachycuje polohu jednotlivých ploch a), b), c) a d).

Rovina a) je umístěna do středu vinutí kolmo k ose rotace stroje. Roviny b) a c) prochází osou rotace. Rovina b) současně prochází středem permanentních magnetů. Naopak rovina c) je umístěna do mezery mezi sousední magnety. Válcová plocha d) je koncentrická vzhledem k ose rotace a současně prochází střední výškou permanentních magnetů. Pomocí plochy d) lze zobrazit vektory magnetické indukce a ověřit tak správnou orientaci magnetů.

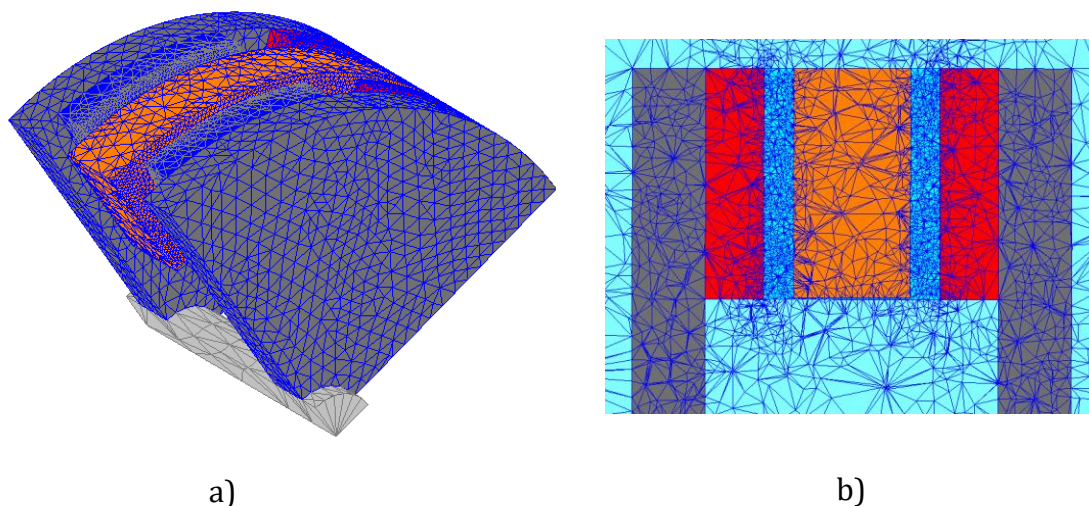


Obr. 28: Plochy pro zobrazení rozložení magnetického pole

### 5.3.5 Výpočetní síť – mesh

Kvalita výpočetní sítě sehrává podstatnou roli v korektnosti výstupních hodnot. Důraz je kladen zejména na vzduchovou mezeru. Obecná doporučení jsou minimálně 4 elementy na délku vzduchové mezery. Z pohledu rozptylových toků je rovněž potřebná dostatečná hustota sítě v okolí vinutí, vzduchové mezery a permanentních magnetů.

Maximální délka strany elementu ve vzduchové mezeře byla omezena na velikost 1,5 mm. Na Obr. 29 je znázorněna použitá výpočetní síť při statické analýze magnetického pole.



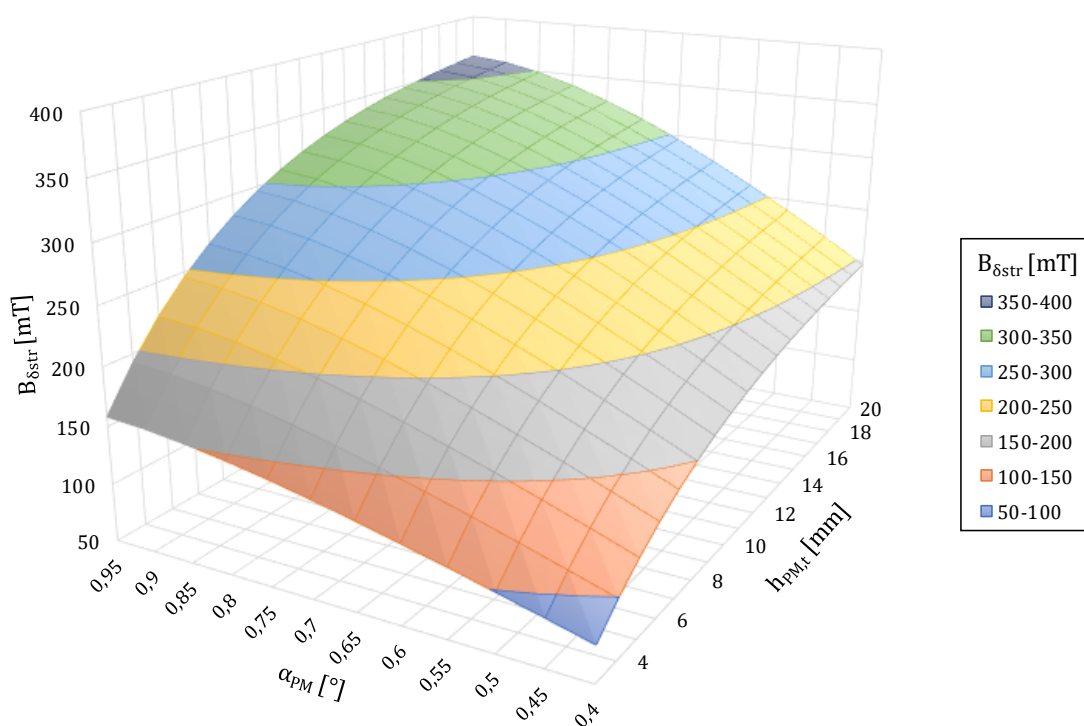
Obr. 29: Zobrazení výpočetní sítě a) celkový pohled, b) řezová rovina „b“

### 5.3.6 Ověření střední magnetické indukce ve vinutí

Účelem kapitoly bylo ověřit a případně provést korekci analyticky vypočtené tloušťky permanentního magnetu  $h_{PM,t}$ . Vinutí stroje bylo vzhledem k potřebám statické analýzy zjednodušeno na tvar válcového mezikruží. Model vinutí byl sestaven za pomoci hodnot  $D_o$ ,  $D_i$  a  $h_c$  uvedeným v Tab. 4 a Tab. 6.

Na základě informací v literatuře [1] byl zvolen postup výpočtu střední hodnoty indukce tzv. metodou integrace přes objem. Metody integrace přes střední plochu a střední kružnici autor nedoporučuje z důvodu výrazné odchylky od skutečné hodnoty. Pro určení střední indukce v objemu vinutí byla použita funkce kalkulátoru. Výpočet „přes objem“ je založen na integraci magnetické indukce v určitém objemu. Samotný zápis pro výpočet střední magnetické indukce v objemu vinutí v prostředí ANSYS Maxwell je následující: „Scl:/Integrate(Volume(winding), Abs(ScalarZ(<Bx,By,Bz>))), Integrate(Volume(winding), 1))“.

Položkou „Quantity“ jsou zvoleny vektory magnetická indukce „ $\langle B_x, B_y, B_z \rangle$ “. Pomocí funkce „Scal?“ se vybere pouze momentotvorný vektor „ScalarZ“. V případě axiálního stroje jsou momentotvorné vektory pouze vektory indukce rovnoběžné s osou rotace (rotační osou je osa z viz Obr. 26). Magnetický tok prostupuje vinutím v obou směrech. Zvolený vektor indukce může nabývat dle svého směru kladné nebo záporné hodnoty (integrací by došlo k vzájemnému odečtení). Velikost vektoru je možné získat aplikováním absolutní hodnoty „Abs“. Vzniklý zápis se volbou „ $\int$ “ integruje podle objemu vinutí. Pro získání výsledné hodnoty střední magnetické indukce je dodatečně nutné podělit hodnotu předešlého integrálu integrálem skalární konstanty 1 podle objemu vinutí.



Obr. 30: Závislost magnetické indukce na tloušťce a pólovém krytí magnetů

Analyticky vypočtená výška magnetu při pólovém krytí 0,637 byla 5,7 mm. Střední hodnota magnetické indukce v objemu vinutí dosahuje při těchto rozměrech magnetu pouze hodnoty 190 mT. Nižší hodnota indukce je způsobena rozptylovými toky, které analytický výpočet neuvažuje. Pro dosažení požadované indukce 250 mT bylo zapotřebí provést korekci rozměrů.

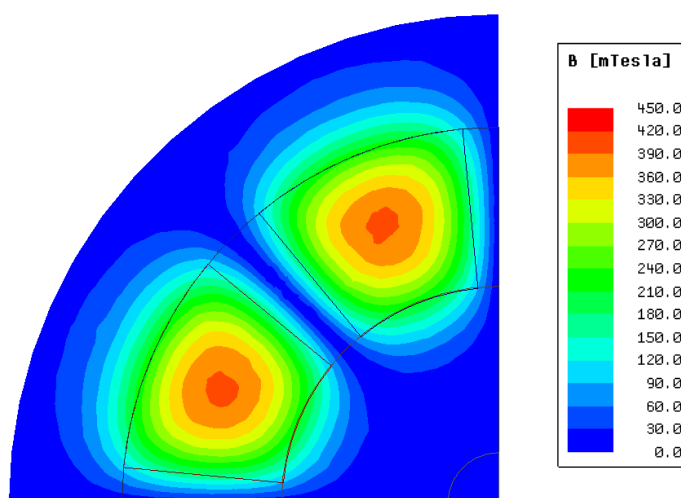
Prostřednictvím tzv. modulu optimetric byla zjištěna výrazná závislost pólového krytí na výslednou indukci. Modul optimetric slouží pro postupné analyzování modelu v zadaném kroku jedné či více proměnných parametrů. Na Obr. 30 se nachází prostorová závislost střední magnetické indukce v objemu vinutí v závislosti na pólovém krytí a tloušťce magnetů.

Pro dosažení menší tloušťky PM byla upravena velikost pólového krytí na hodnotu 0,750. Vyšší hodnota pólového krytí nebyla zvolena vzhledem k montáži magnetů na rotory. Pólového krytí o velikosti 1 by znamenalo stav bezprostředního kontaktu sousedních magnetů. Magnetický zkrat je pro software Maxwell neřešitelný.

Nová tloušťka magnetů byla hledána pomocí modulem optimetric. Indukce 250 mT s pólovým krytím 0,750 bylo dosaženo při tloušťce magnetu 7,7 mm. V případě zachování pólového krytí 0,637 je pro dosažení požadované indukce 250 mT zapotřebí tloušťka magnetu minimálně 10,4 mm.

Při poptávání výroby byly navržené rozměry permanentních magnetů dodatečně zaokrouhleny (viz příloha 3): tloušťka 8 mm (původně 7,7 mm), pólové krytí 0,756 (původně 0,750).

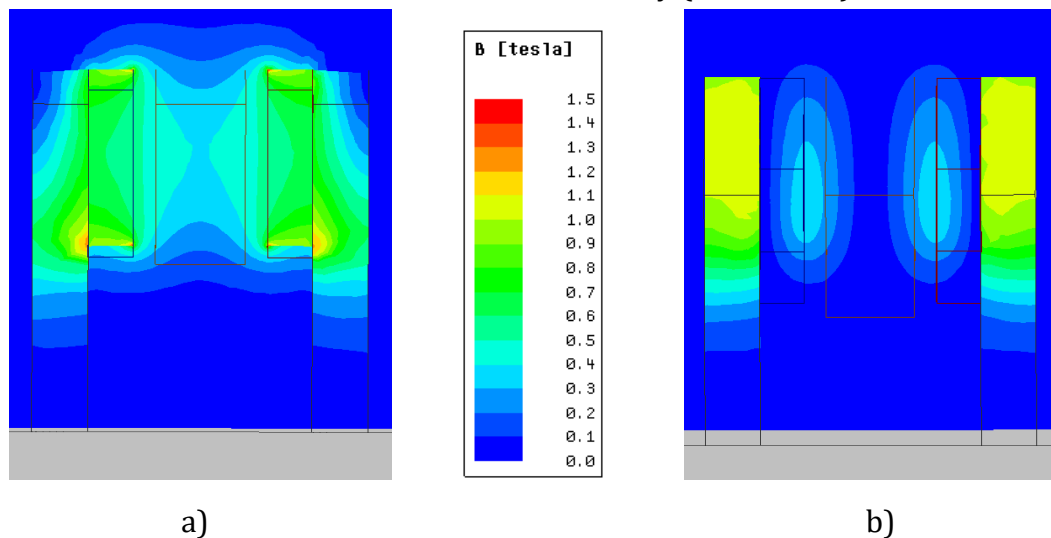
Rozložení magnetické indukce ve vinutí na rovině „a“ při výšce permanentních magnetů 8 mm a pólovém krytí 0,756 zachycuje Obr. 31. Maximální indukce se nachází mezi středy protilehlých magnetů. Velikost indukce zde dosahuje 415 mT.



Obr. 31: Rozložení magnetické indukce na rovině „a“

### 5.3.7 Ověření sycení rotorového jha

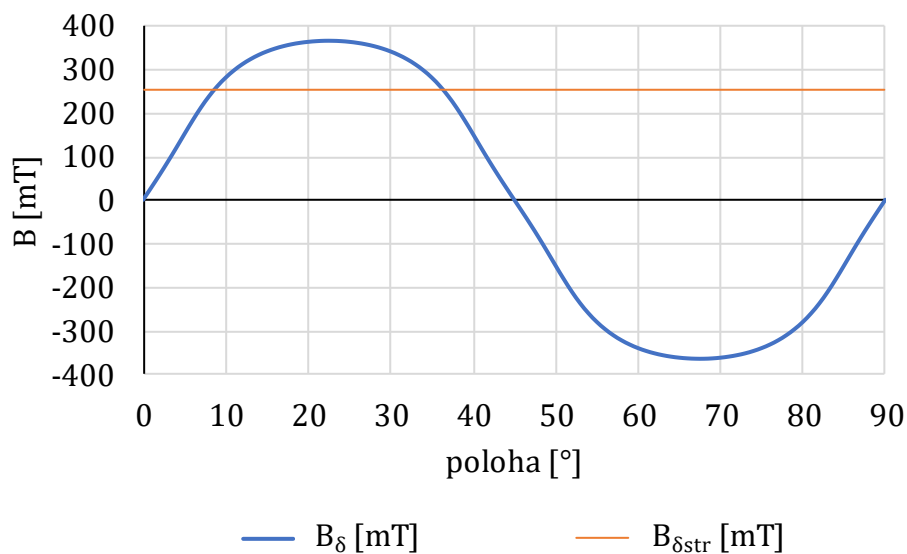
Tloušťka rotorového jha  $h_r$  byla v kapitole pouze odhadnuta. Pro ověření, zda nedochází k přesycování magnetického obvodu rotoru, bylo zobrazeno rozložení magnetické indukce v rovinách „b“ a „c“ (viz Obr. 32). Z výsledků rozložení pole plyne, že při tloušťce rotorového jha 10 mm k přesycování nedochází. Indukce v obou řezech leží v lineární části BH charakteristiky (viz Obr. 27).



Obr. 32: Rozložení magnetické indukce v rovině a) „b“ a b) „c“

### 5.3.8 Průběh magnetické indukce v objemu vinutí

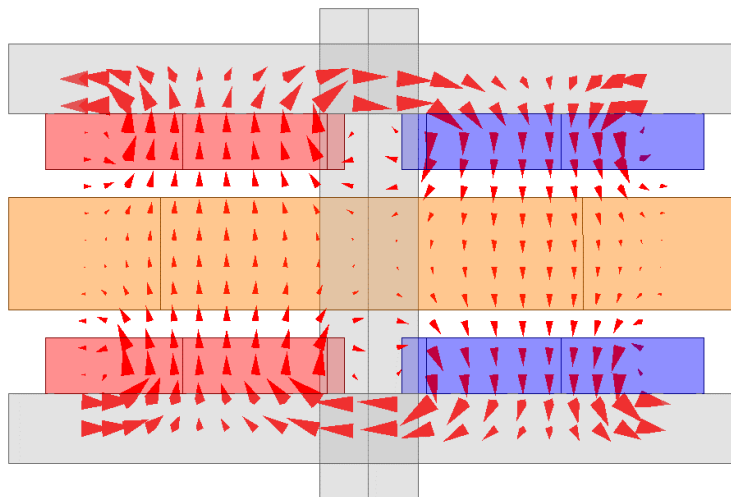
Pro výšku magnetů 8 mm a pólové krytí 0,756 byla vypočítána magnetická indukce v objemu vinutí  $B_\delta$  v závislosti na úhlové poloze. Průběh indukce pod jednou pólovou dvojicí je vynesena na Obr. 33. Dále je do grafu současně zanesena i střední hodnota magnetické indukce ve vinutí.



Obr. 33: Průběh magnetické indukce v objemu vinutí

### 5.3.9 Ověření okrajových podmínek a orientace magnetů

Pro zhodnocení správné orientace permanentních magnetů byly zobrazeny vektory magnetické indukce na cylindrické ploše „d“. Z Obr. 34 je patrná správně nastavená topologie ve smyslu SJ. Magnetický tok se uzavírá přes obě rotorová jha. Ze směru vektorů je také zřejmý parazitní tok v okolí sousedních magnetů. Na řezových okrajích čtvrtiny modelu dochází k správnému uzavírání toků skrze nastavené okrajové podmínky „Master“ a „Slave“.



Obr. 34: Zobrazení vektorů magnetické indukce na ploše d

## 5.4 Transientní analýza magnetického pole v motoru

V rámci kapitoly 5.3 byl předběžně navržený motor ověřován a upravován na základě statických výpočtů. Dvojice rotorů byla vzhledem ke statoru v klidu a vinutí statoru nebylo napájeno.

Hlavním cílem této kapitoly bylo naopak navržený stroj podrobit analýze při vlastním pohybu. V závislosti na sledované veličině byly v průběhů simulací statorové cívky napájeny případně nenapájeny. Klid a pohyb těles je relativní, vždy zaleží na zvolené vztažné soustavě. Z pohledu výstupních hodnot jsou následující stavy navzájem ekvivalentní:

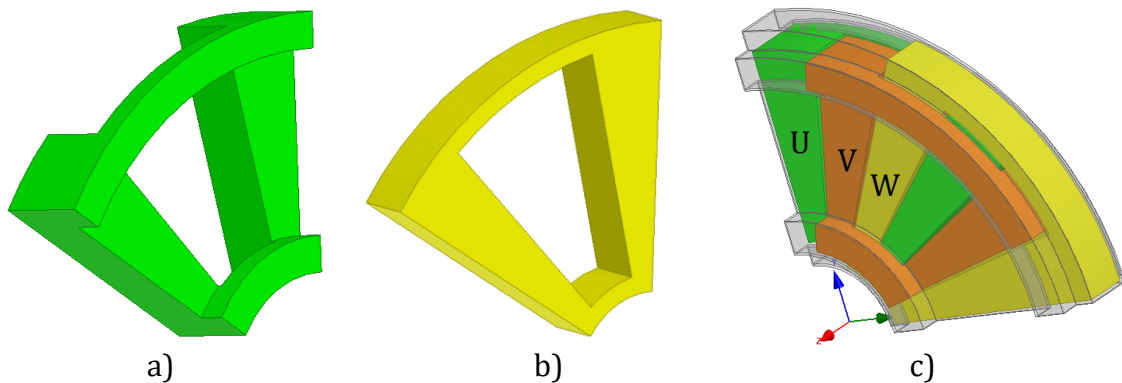
- rotační pohyb rotoru vzhledem k nehybnému statoru,
- rotační pohyb statoru vzhledem k nehybnému rotoru.

Pro daný motor je výhodnější realizovat rotační pohyb statorového vinutí. Transientní výpočty nelze provádět ve spojitém čase, ale pouze v předem zvolených diskrétních bodech. Podstatnými parametry jsou celková doba simulace (Stop time) a délka jednotlivých časových kroků (Time step). Vlastní velikost těchto parametrů je zejména dána počtem pólů a otáčkami stroje. Dále závisí na požadovaném počtu period a počtu kroků v jedné periodě.

### 5.4.1 Model vinutí

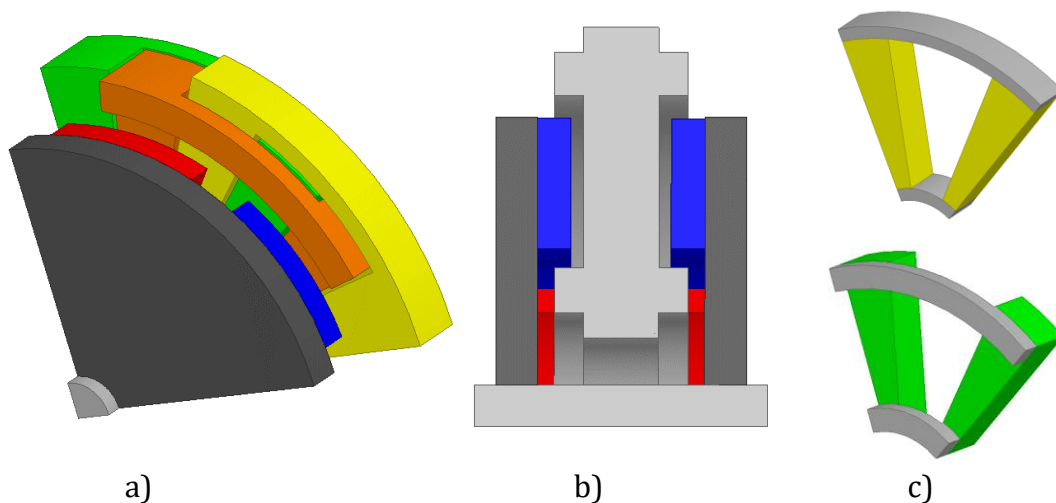
Zjednodušený model vinutí postačil pouze pro účely statické simulace (jednoduché válcové mezikruží viz Obr. 25 c)).

V rámci transientní analýzy bylo vytvořeno třífázové rozložené vinutí s lichoběžníkovými cívkami. Cívková čela musela být modelově provedena tak, aby nedocházelo k překryvu jejich objemů a současně bylo umožněno propojení obou cívkových stran. Kompletní model vinutí obsahuje dvojici cívek: cívka s vysokým čelem (Obr. 35 a)) a cívka s ohnutým čelem (Obr. 35 b)). Model  $\frac{1}{4}$  třífázového vinutí se nachází na Obr. 35 c). Jednotlivé fáze jsou značeny písmeny U, V, W. Fáze U a V je složena z cívek s ohnutým čelem. Fázi W tvoří cívky s vysokým čelem.



Obr. 35: Model a) cívky s ohnutým čelem, b) cívky s vysokým čelem a c) třífázového vinutí

Cívková čela jsou modelována v dostatečné vzdálenosti od rotorových magnetů (viz Tab. 13). Tento odstup zaručí potřebný prostor pro odvod tepla ze vzduchové mezery a současně nemůže, při vychýlení magnetických ložisek, dojít k dotyku mezi statorem a rotory. Pro zkrácení výpočetního času byla simulována opět pouze čtvrtina stroje (viz obr. Obr. 36 a)).



Obr. 36: a) sestava motoru bez „band“, b) kompletní model, c) dělené cívky

ANSYS Maxwell pro definici pohybů využívá tzv. band, který ohraničuje prostor určený k pohybu. Rozlišuje se „band“ vnitřní a vnější. Odstup vnitřního „band“ od vinutí byl nastavena na 0,5 mm. Odstup vnějšího od vnitřního „band“ byl stanoven rovněž na 0,5 mm. Pro vytvoření modelu vinutí spolu s „band“ byl využit 3D CAD Autodesk Inventor (viz Obr. 36 b)).

Cívky byly s cílem výpočtu střední magnetické indukce rozděleny na objem čel vinutí a aktivních částí (viz Obr. 36 c)). Dělené cívky je možné využít například pro výpočet vířivých ztrát v čelech vinutí. Na základě provedených zkušebních simulací bylo zjištěno, že rozdělení žádným způsobem neovlivňuje výpočet. Software Maxwell považuje samostatné objemy, které se nachází v kontaktním styku, za spojitou vodivou dráhu.

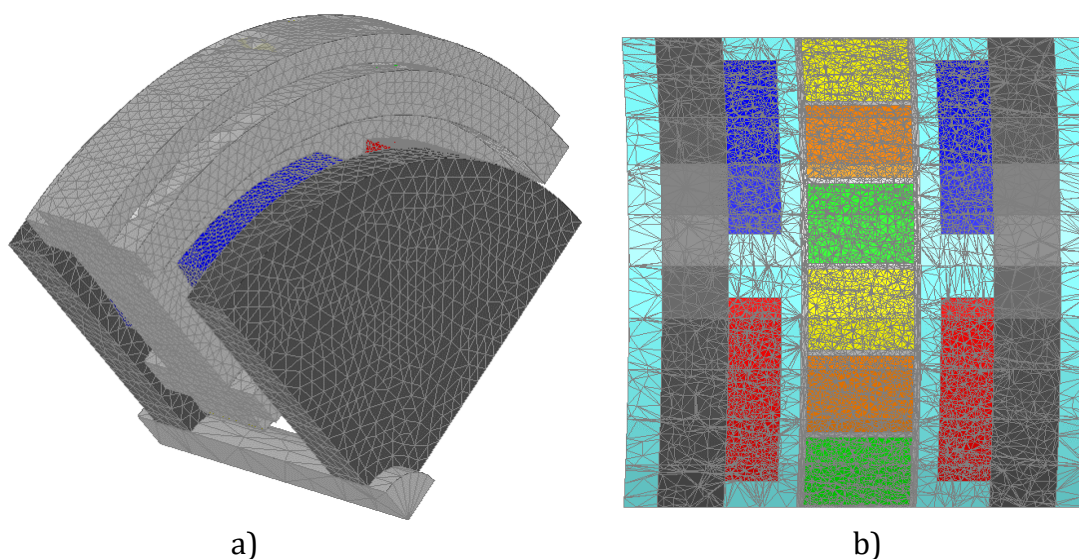
## 5.4.2 Výpočetní síť – mesh

Hustota výpočetní sítě byla stanovena tak, aby přesnost výpočtu byla dostatečná vzhledem k řešení úloze. Nastavené maximální délky hran výpočetních elementů jsou zapsány v Tab. 11.

**Tab. 11: Maximální velikost elementů – transientní analýza magnetického pole**

| Magnety | Cívky | Band | Jho  |
|---------|-------|------|------|
| 2 mm    | 2 mm  | 4 mm | 5 mm |

Při použití „bandů“ je často problém s vytvořením automatické výpočetní sítě. Kritickým místem jsou obvykle oblouky čel vinutí. V případě dělených cívek lze aplikovat funkci meshování „Surface Approximation“, která vytvoří rovnoměrnou síť na zaoblených tvarech. Zobrazení výpočetní sítě využívané při transientních výpočtech se nachází na Obr. 37.

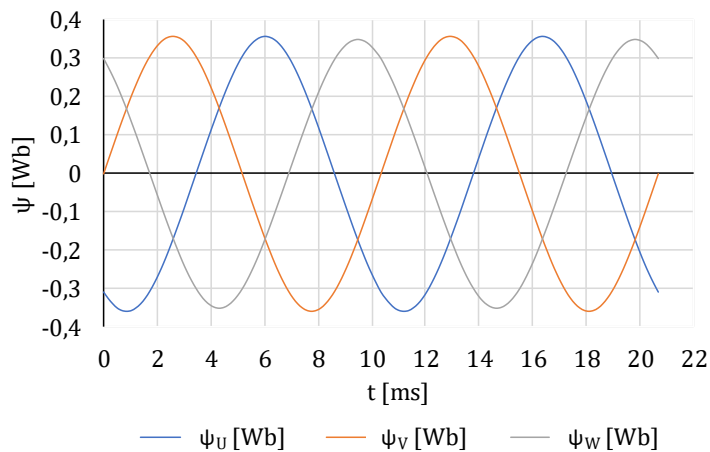


**Obr. 37: Výpočetní síť – transientní analýza a) úplný model, b) řez na ploše „d“**

### 5.4.3 Výpočet indukovaného napětí

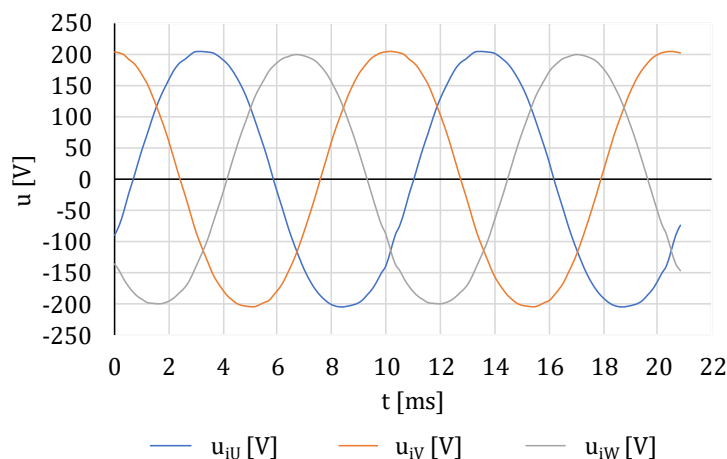
Výpočet indukovaného napětí se realizoval pro ověření a případnou korekci parametrů vinutí. Dalším účelem výpočtu bylo samotné ověření funkce a nastavení přechodové analýzy. V průběhu simulací byla porovnávána velikost indukovaného napětí s hodnotou vypočtenou analytickými vztahy v příloze 1.

Uvažované parametry motoru při simulacích v této podkapitole byly následující: jmenovité otáčky ( $1450 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ), výška magnetů 8 mm, teplota magnetů  $40^\circ \text{C}$ .



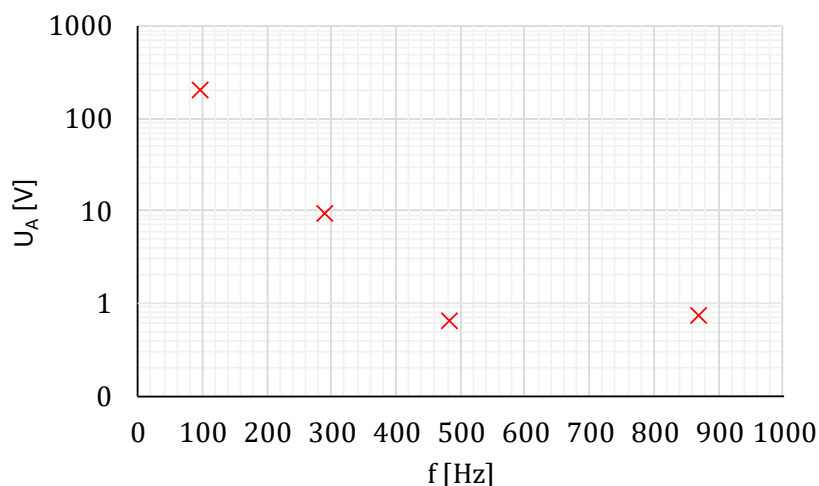
**Obr. 38: Spřažený magnetický tok ve fázi U, V, W (před korekcí počtu závitů)**

Software ANSYS Maxwell obsahuje předdefinovanou funkci „InducedVoltage“ pro indukované napětí. Případně je možné vycházet z definice indukovaného napětí a provést derivaci spřaženého magnetického toku podle času. Na Obr. 38 se nachází průběh spřaženého magnetického toku v jednotlivých fázích. Průběh indukovaného napětí ve fázích U, V, W je zobrazen na Obr. 39.



**Obr. 39: Indukované napětí ve fázi U, V, W (před korekcí počtu závitů)**

Ve výsledcích je patrný rozdíl velikostí amplitud indukovaného napětí (případě spřaženého magnetického toku) vinutí U a V oproti vinutí fáze W. Rozdíl je způsoben odlišným provedením cívkových čel fáze W (cívka se vysokým čelem).



**Obr. 40: FFT indukovaného napětí ve fázi W (před korekcí počtu závitů)**

Průběh indukovaného napětí ve fázi W byl pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT) rozložen na harmonické složky (viz Obr. 40). Kvalita meshování může způsobovat zobrazování harmonických složek, které se z fyzikální podstaty nemohou vyskytovat. Indukované napětí je v každé fázi vzhledem k nulové ose symetrické. Výskyt složky nulové včetně složek sudých je zde vyloučen. Harmonické složky menší než 0,5 V byly zanedbávány.

Dominantní složkou je první harmonická o frekvenci 96,67 Hz s amplitudou 207,4 V. Amplituda třetí harmonické nabývá velikosti 9,1 V. Amplitudy páté a deváté harmonické dosahují hodnoty 0,7 V. Zapojením konců vinutí do hvězdy se navíc odstraní třetí harmonická složka. S analytickým výpočtem byla srovnávána velikost první harmonické složky (analytický výpočet uvažuje existenci pouze první harmonické složky).

**Tab. 12: Velikosti první harmonické složky indukovaného napětí před korekcí**

|                     | MKP výpočet |     |     |                  | Analytický výpočet | Odchylka analytického výpočtu od MKP |
|---------------------|-------------|-----|-----|------------------|--------------------|--------------------------------------|
|                     | Fáze        |     |     | Průměrná hodnota |                    |                                      |
|                     | U           | V   | W   |                  |                    |                                      |
| U <sub>A</sub> [V]  | 214         | 214 | 207 | 212              | 173                | 39                                   |
| U <sub>ef</sub> [V] | 151         | 151 | 146 | 149              | 122                | 27                                   |

Na základě rozkladů napětí do frekvenčního spektra byla sestavena Tab. 12. Nachází se zde velikosti první harmonické složky napětí společně s hodnotou napětí vypočtenou analyticky. Z vytvořené tabulky plyne, že napětí dle MKP je vyšší než napětí vypočtené analyticky. Odchylka průměrné efektivních hodnoty činí 27 V. Rozdíl je způsoben provedením modelu vinutí. Samotné vinutí je vzhledem k magnetům přesazeno. Analytický výpočet uvažuje vinutí zakončené s hranami permanentních magnetů. Vlivem rozptylových toků a větší plochy cívek došlo k navýšení indukovaného napětí. V Tab. 13 jsou uvedeny poloměry magnetů

společně s poloměry cívek ve statoru. Rozměry cívkových čel byly voleny tak, aby odpovídaly reálnému tvaru.

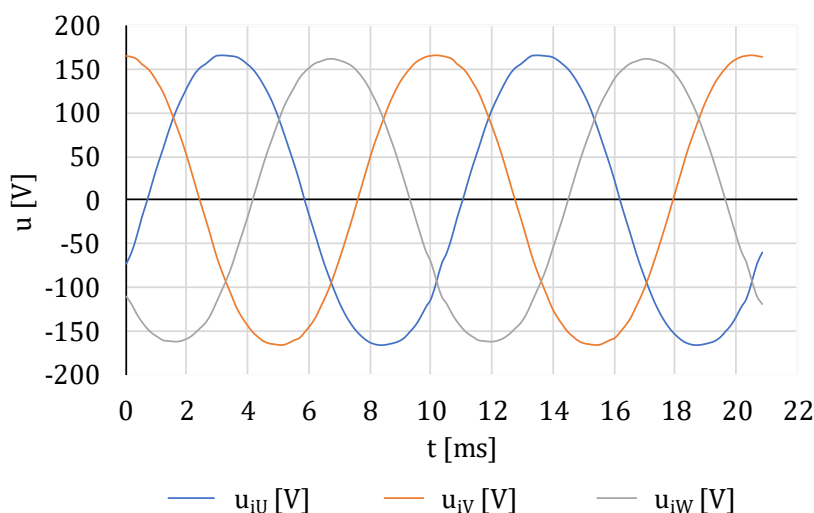
**Tab. 13: Horní a spodní poloměry permanentních magnetů a cívek**

| Poloměr |      | Permanentní magnety | Cívka           |                 |
|---------|------|---------------------|-----------------|-----------------|
|         |      |                     | s vysokým čelem | s ohnutým čelem |
| Horní   | [mm] | 74,0                | 94,5            | 88,5            |
| Spodní  | [mm] | 42,5                | 22,2            | 28,2            |

Pro snížení indukovaného napětí je možné provést korekci počtu závitů pomocí poměrového vztahu (5.7). Kde  $N_2$  značí nový počet závitů. Vstupní hodnotami jsou indukované napětí při plném počtu závitů  $U_{i1}$  (173 V), žádaná velikost indukované napětí  $U_{i2}$  (122 V) a počáteční počet závitů  $N_1$  (198 závitů).

$$\frac{U_{i1}}{N_1} = \frac{U_{i2}}{N_2} \quad (5.7)$$

Rovnicí (5.7) bylo určeno 644 závitů na fázi. Daný počet závitů je celočíselně dělitelný čtyřmi (čtyři cívky v jedné fázi), proto nebylo nutné počet dodatečně upravovat. Každá cívka bude po korekci obsahovat 161 závitů.



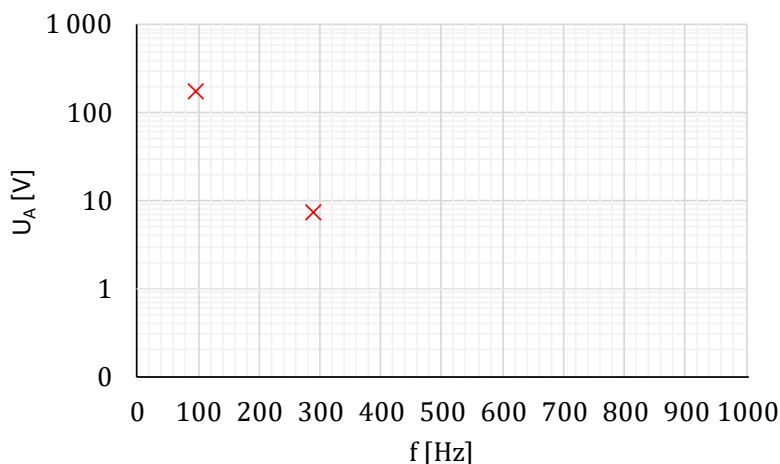
**Obr. 41: Průběh indukovaného napětí ve fázi U, V, W (po korekci počtu závitů)**

S novým počtem závitů na fázi byl MKP výpočet opakován. Na Obr. 41 se nachází průběh indukovaných napětí při 161 závitěch. Rozdíl napětí mezi MKP a analytickou hodnotou napětí je nulový (viz Tab. 14).

**Tab. 14: Velikosti první harmonické složky indukovaného napětí po korekci**

|                     | MKP výpočet |     |     |                  | Analytický výpočet | Odchylka analytického výpočtu od MKP |
|---------------------|-------------|-----|-----|------------------|--------------------|--------------------------------------|
|                     | Fáze        |     |     | Průměrná hodnota |                    |                                      |
|                     | U           | V   | W   |                  |                    |                                      |
| U <sub>A</sub> [V]  | 175         | 175 | 170 | 173              | 173                | 0                                    |
| U <sub>ef</sub> [V] | 124         | 124 | 120 | 122              | 122                | 0                                    |

Amplitudy harmonických složek ve frekvenčním spektru poklesly (viz Obr. 42). První harmonická složka snížila svoji hodnotu na 169,5 V (96,67 Hz). Třetí harmonická nabývá amplitudy 7,3 V. Amplitudy páté a deváté harmonické poklesly pod hodnotu 0,5 V a do grafu nebyly zaneseny.



**Obr. 42: FFT indukovaného napětí ve fázi W (po korekci počtu závitů)**

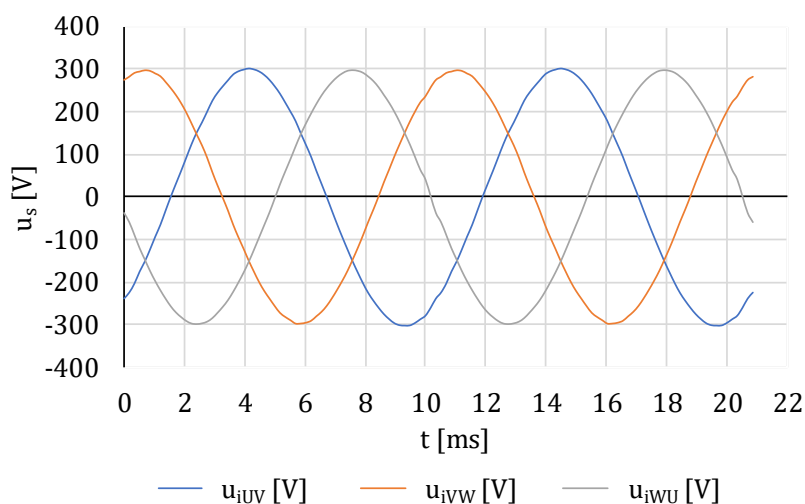
Na Obr. 43 je vyneseno průběh sdružených indukovaných napětí při 161 závitěch na cívk. Maximální hodnota sdruženého napětí je 303 V.

$$u_{iUV}(t) = u_{iU}(t) - u_{iV}(t) \quad (5.8)$$

$$u_{iVW}(t) = u_{iV}(t) - u_{iW}(t) \quad (5.9)$$

$$u_{iWU}(t) = u_{iW}(t) - u_{iU}(t) \quad (5.10)$$

Průběh sdružených napětí byl získán rozdílem okamžitých hodnot odpovídajících fázových napětí (viz rovnice (5.8),(5.9) a (5.10))



**Obr. 43: Průběh sdružených indukovaných napětí (po korekci počtu závitů)**

#### 5.4.4 Analýza motoru při zatížení

V rámci kapitoly bylo uskutečněno napájení jednotlivých fází statoru. Samotné napájení bylo provedeno proudovým zdrojem o sinusovém průběhu s definovanou amplitudou a frekvencí. Proudový zdroj byl definován za pomoci rovnic (5.12) až (5.14), které vycházejí ze základní rovnice pro harmonický průběh (viz (5.11)).

$$i(t) = I_{max} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (5.11)$$

Součin úhlové rychlosti  $\omega$  s časem  $t$  byl pro účely v Maxwellu nahrazen součinem parametru „Position“ s počtem pólových dvojic. Implementovaná proměnná „Position“ udává úhlové natočení v závislosti na čase. Úhel  $0^\circ$  značí výchozí polohu. V případě konstantních otáček je charakterem „Position“ lineárně rostoucí přímka. Výsledná směrnice této přímky je dána počtem otáček za minutu. Dále za fázový posuv  $\varphi$  byl dosazen součet fázového posuvu (vzhledem k fázi U) a zátěžného úhlu  $\beta$ .

Pomocí zátěžného úhlu lze simulovat vnitřní moment motoru. Překročením zátěžného úhlu  $90^\circ$  tzv. meze stability dochází k vypnutí stroje ze synchronismu. V takovém stavu není možné dále stroj provozovat a musí být bezodkladně odstaven. Mez stability představuje maximální moment, který synchronní stroj dokáže za určitých podmínek vyvinout.

$$i_U(t) = I_{max} \cdot \sin\left(\frac{2p}{2} \cdot Position + \beta\right) \quad (5.12)$$

$$i_V(t) = I_{max} \cdot \sin\left(\frac{2p}{2} \cdot Position + \frac{2}{3}\pi + \beta\right) \quad (5.13)$$

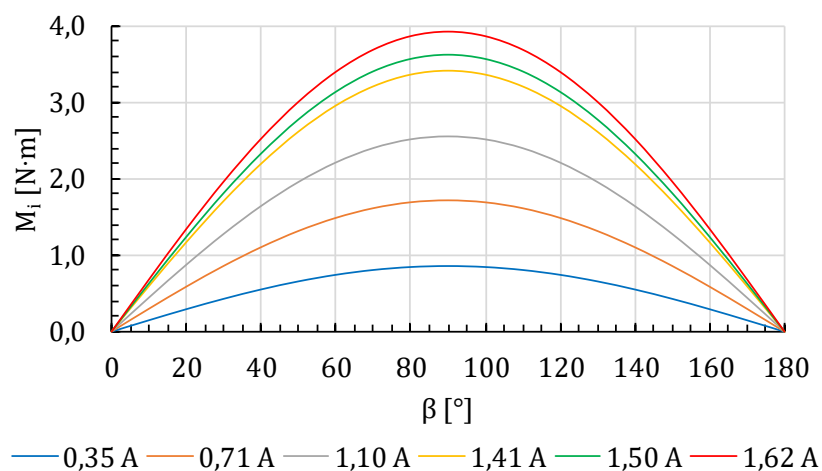
$$i_W(t) = I_{max} \cdot \sin\left(\frac{2p}{2} \cdot Position - \frac{2}{3}\pi + \beta\right) \quad (5.14)$$

Pokud v rámci této kapitoly nebude v konkrétním případě uvedeno jinak (např. závislost na určité veličině) platí následující nastavení MKP simulací: tloušťka magnetů 8 mm, 161 závitů na cívku a jmenovitý proud 1,5 A, otáčky  $1450 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$  a teplota magnetů i vinutí  $40^\circ \text{C}$ .

Pomocí modulu optimetrics byla sledována závislost vnitřního momentu  $M_i$  na zátěžném úhlu pro různé efektivní hodnoty proudu. Na základě získaných hodnot byly vyneseny momentové charakteristiky na Obr. 44. Vnitřní moment byl sledován při následujících velikostech proudu: 0,35 A, 0,71 A, 1,1 A, 1,41 A, 1,50 A a 1,62 A. Při analytickém výpočtu vnitřního momentu stroje byl uvažován obecný zátěžný úhel. Vynesené momentové charakteristiky znázorňují velikost vnitřního momentu. Skutečný moment na hřídeli bude snížen mechanickými ztrátami (třením rotorů).

Moment na mezi statické stability při jmenovitém proudu motoru 1,50 A dosahuje hodnoty  $3,6 \text{ N} \cdot \text{m}$ . Analyticky vypočtený jmenovitý moment  $3,2 \text{ N} \cdot \text{m}$  je nižší, a tedy leží v intervalu mezi momentem nulovým a mezi statické stability. V případě maximálního proudu 1,62 A je hodnota momentu na mezi stability  $3,9 \text{ N} \cdot \text{m}$ . Uvažovaný maximální moment při analytickém výpočtu  $3,5 \text{ N} \cdot \text{m}$  je nižší a rovněž

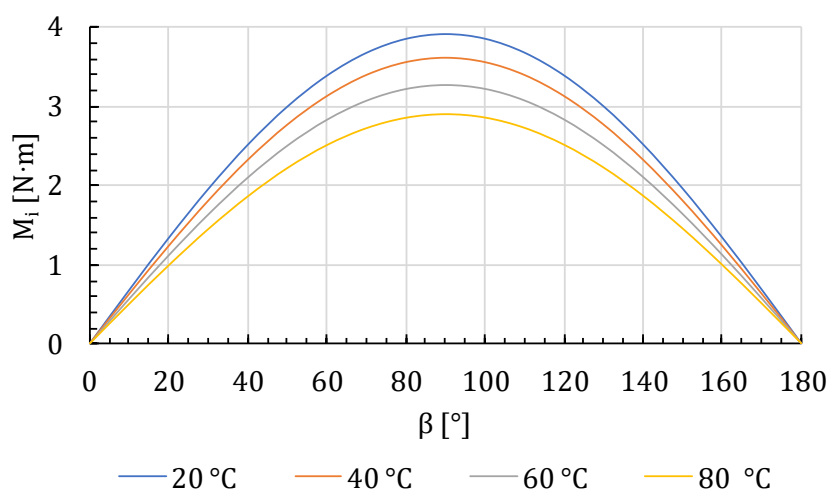
leží v intervalu mezi momentem nulovým a mezí statické stability. Vlastní tvar charakteristik se shoduje s tvarem momentových charakteristik běžných synchronních strojů s hladkým rotorem.



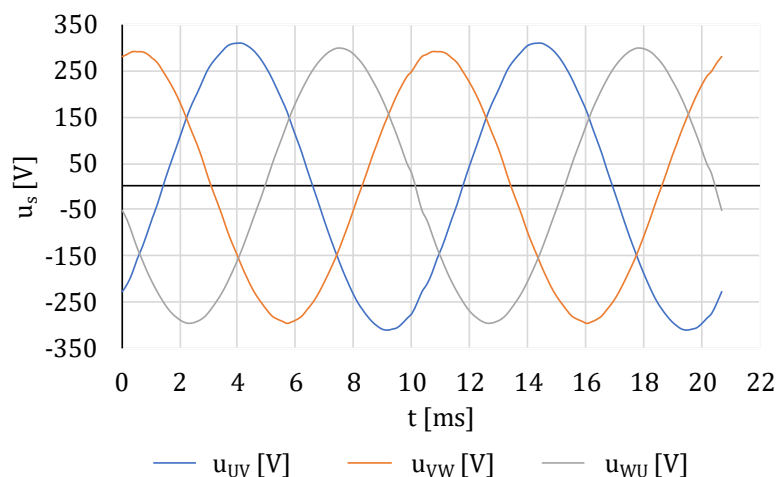
**Obr. 44: Závislost vnitřního momentu na zátěžném úhlu pro rozdílné velikosti proudu**

V kapitole 5.2.2 byla řešena změna vlastností permanentních magnetů s teplotou. S rostoucí teplotou dochází ke snížení remanentní indukce a koerzivní síly. V případě motoru se změna projeví snížením vnitřního momentu. Na Obr. 45 byly vyneseny momentové charakteristiky při různých teplotách permanentních magnetů (20 °C, 40 °C, 60 °C a 80 °C).

Moment na mezí statické stability se v případě oteplení permanentních magnetů z 20 °C na 80 °C liší o 1 N·m. Při teplotě 80 °C je maximální hodnota momentu při zátěžném úhlu 90° nižší než jmenovitý moment. V kapitole 5.5 je provedena estimace tepelných poměrů v motoru při ustáleném chodu. Tepelná závislost výstupních parametrů je obecně komplikací při navrhování pohonů.



**Obr. 45: Závislost vnitřního momentu na zátěžném úhlu pro rozdílné teploty magnetů**



**Obr. 46: Průběh napájecího napětí motoru při  $I_n$ ,  $n_n$  a  $\beta = 90^\circ$**

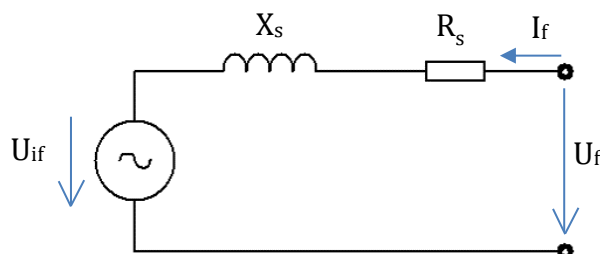
Dále byly simulovány průběhy sdružených napětí na výstupu měniče při jmenovitých otáčkách, jmenovitém proudu a zátěžném úhlu  $90^\circ$ . Pro vytvoření odpovídajících průběhů napětí byly pomocí tzv. „Output Variables“ zapsány rovnice pro výpočet hodnot okamžitých fázových napětí měniče (viz příklad rovnic (5.15) a (5.16) pro fázi U a V). Sdružená napětí byla získána odečtením odpovídajících fázových napětí (viz rovnice (5.17) pro sdružené napětí mezi fázemi U a V). Analogicky lze zapsat rovnice pro sdružená napětí  $U_{VW}$ ,  $U_{WU}$  a fázové napětí W.

$$u_U(t) = \frac{d\psi_U(t)}{dt} + R_s \cdot i_U(t) \quad (5.15)$$

$$u_V(t) = \frac{d\psi_V(t)}{dt} + R_s \cdot i_V(t) \quad (5.16)$$

$$u_{UV}(t) = u_U(t) - u_V(t) \quad (5.17)$$

Rovnice (5.15) a (5.16) vychází z náhradního obvodu synchronního motoru (viz Obr. 47). Indukované napětí je nižší než napětí napájecí, protože průchodem proudu dochází k úbytku napětí na odporu vinutí  $R_s$  a synchronní reaktanci  $X_s$ . Synchronní reaktance je absolutní hodnota vektorového součtu reaktancí v ose  $d$  a  $q$ , které byly počítány v rámci kapitoly 5.2.3. Na Obr. 46 se nachází výsledný průběh sdružených napětí na vstupních svorkách motoru.



**Obr. 47: Náhradní schéma jedné fáze synchronního motoru**

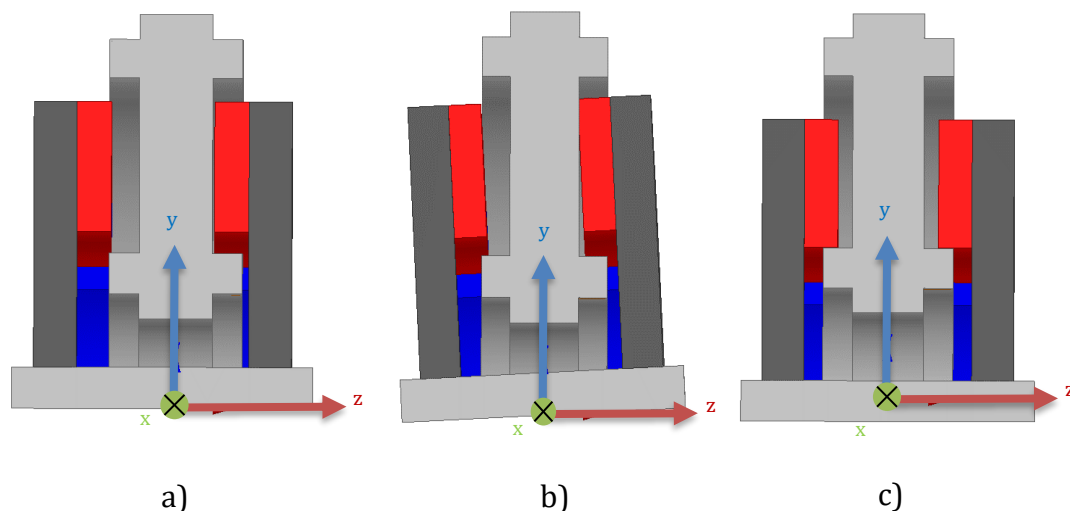
### 5.4.5 Vliv vychýlení rotorů na činnost motoru

Vzhledem k magnetickému ložiskovému systému je současně nutné uvažovat i možné vychýlení rotorů vůči statoru. Jedná se o trojici translačních pohybů (v ose  $x$ ,  $y$  a  $z$ ) a dvojici rotačních pohybů v ose  $x$  nebo  $y$ . Hodnoty mezních výchylek se nachází v Tab. 15. Kde  $\Delta x_{\max}$  značí maximální výchylku rotoru v ose  $x$ ,  $\Delta y_{\max}$  je maximální výchylka rotoru v ose  $y$ ,  $\Delta z_{\max}$  je maximální výchylka rotoru v ose  $z$  a  $\alpha_{xy,\max}$  je maximální úhel radiálního náklonu vůči rovině  $xy$ . Umístění základního souřadného systému  $x, y, z$  odpovídá zobrazení na Obr. 48. Při překročení mezních výchylek dojde ke kontaktu protilehlých konstrukčních částí (motoru případně některého z ložisek).

Tab. 15: Mezní výchylky rotorů statoru navrhovaného motoru

| $\Delta x_{\max}$<br>[mm] | $\Delta y_{\max}$<br>[mm] | $\Delta z_{\max}$<br>[mm] | $\alpha_{xy,\max}$<br>[°] |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| $\pm 0,6$                 | $\pm 0,6$                 | $\pm 2$                   | $\pm 0,3$                 |

Z pohledu vychýlení je nejvíce kritické ložisko axiální, které se skládá pouze z permanentních magnetů (viz kapitola 4 pojednávající o celkové koncepci a uspořádání čerpadla). Výslednou výchylku pasivního ložiska nelze oproti aktivním žádným způsobem ovlivnit.



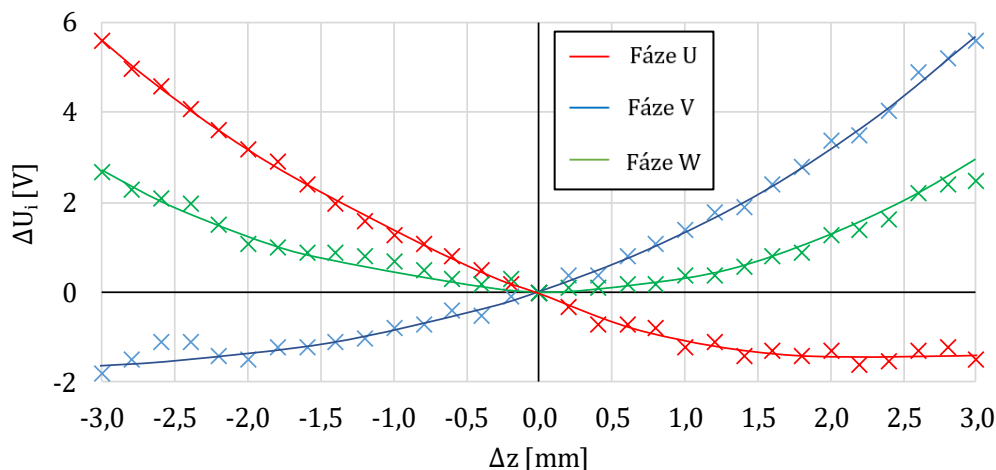
Obr. 48: Vychýlení: a) axiální v ose  $x$ , b) úhlové v rovině  $xy$ , c) radiální v ose  $z$

Uvažované parametry motoru při simulacích v této podkapitole byly následující: jmenovité otáčky  $1450 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ , jmenovitý proud  $1,5 \text{ A}$ , zátěžný úhel  $90^\circ$ , výška magnetů  $8 \text{ mm}$ , teplota vinutí a magnetů  $40^\circ \text{C}$ .

Při analýze byla nejprve sledována změna fázové hodnoty indukovaného napětí  $\Delta U_i$  v závislosti na posunu v ose  $z$   $\Delta z$  (viz Obr. 48 b)). Vynesené body změny indukovaného napětí se nachází na Obr. 49. Při výpočtu každého bodu program Maxwell generuje novou výpočetní síť. V důsledku změny geometrie se vytvořená síť může lišit a způsobit tak rozkmit vypočtených bodů. Z vlastního charakteru

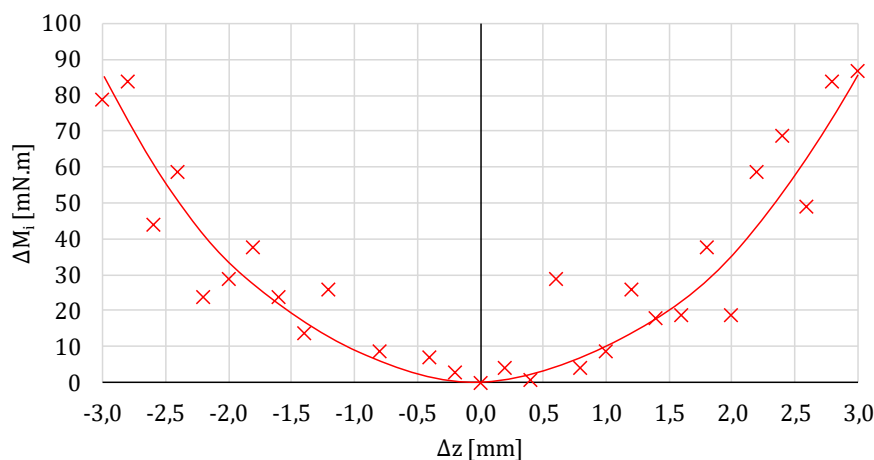
vynesených bodů byly jednotlivé změny indukovaného napětí prokládány nelineárně. Z průběhu je zřejmé, že na každou z fází má vychýlení rozdílný vliv:

- Vychylování v **kladném** směru osy z: napětí fází V a W roste, naopak ve fázi U napětí klesá.
- Vychylování v **záporném** směru osy z: napětí fází U a W roste, naopak napětí ve fázi V klesá. V případě fáze W je růst napětí shodný jako při vychylování v kladném směru.



Obr. 49: Změna indukovaného napětí v závislosti na vychýlení v ose z při  $I_n, n_n$

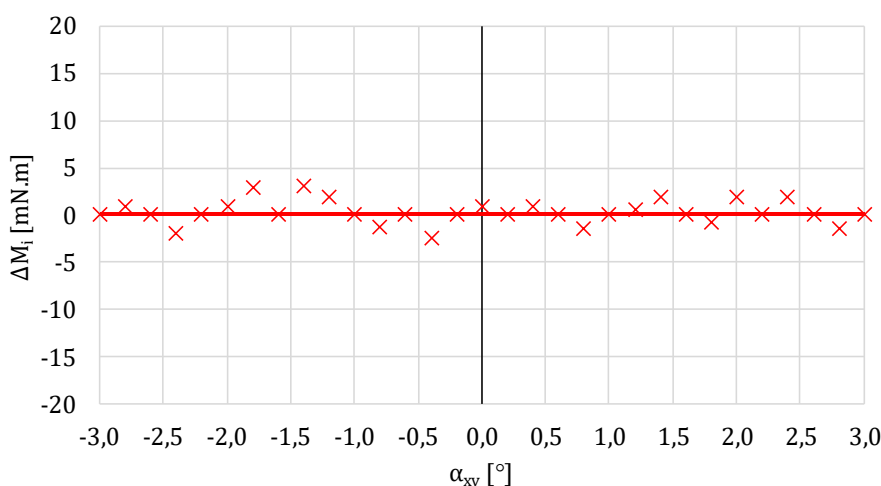
Odlišná odezva každé fáze je způsobena různým provedením, popřípadě orientací cívkových čel. Příčina odlišnosti je nejpatrnější právě v krajních polohách vychýlení (viz Obr. 36 a)). V případě vychýlení rotorů v kladném směru osy z se čela vinutí fáze V (případně U při vychylování v záporném směru osy z) nachází nad horním okrajem permanentních magnetů. Současně čela cívek fáze U (případně V při vychylování v záporném směru osy z) jsou orientována na protilehlou stranu vůči magnetům. Cívky s vysoký čelem (fáze W) se z pohledu pozice čela vzhledem k magnetům nachází na rozhraní mezi cívkovými čely fáze U a V.



Obr. 50: Změna vnitřního momentu při axiálním vychýlení (při  $I_n, n_n$  a  $\beta = 90^\circ$ )

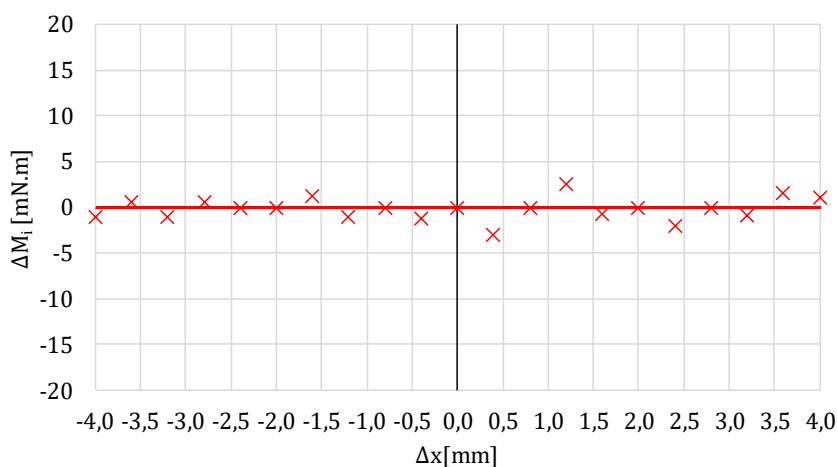
Dále byl zkoumán vliv axiálního vychýlení na změnu vnitřního momentu motoru  $\Delta M_i$ . Z výsledných hodnot byla sestrojena grafická závislost na Obr. 50. Vynesené body vykazují opět nelineární charakter, s vychýlením motoru dochází k nárůstu vnitřního momentu.

V případě disfunkce nebo částečného selhání některého z aktivních ložisek může nastat vychýlení rotorů o úhel  $\alpha_{xy}$  od roviny  $xy$  (viz Obr. 48 b)). Na Obr. 51 jsou vyneseny vypočtené body změny vnitřního momentu stroje v závislosti na úhlu odklonu od roviny  $xy$ . Úhlovým vychýlením nedochází ke změně momentu. Vzniklý rozkmit vypočtených bodů je pravděpodobně způsoben výpočetní sítí.



**Obr. 51: Změna vnitřního momentu při úhlovém vychýlení od roviny  $xy$  (při  $I_n$ ,  $n_n$  a  $\beta = 90^\circ$ )**

Dále byl zkoumán vliv radiálního vychýlení (posun v osách  $x$  a  $y$  viz Obr. 48 c)). Žádná výrazná změna vnitřního momentu vzhledem ke změně radiální polohy nenastala. Vypočtené body změny vnitřního momentu v závislosti na změně polohy v ose  $x$   $\Delta x$  jsou vyneseny na Obr. 52. Vychýlení v ose  $x$  a  $y$  jsou rovnocenné stavy a případná vzájemná kombinace nezpůsobí změnu momentu.



**Obr. 52: Závislost vnitřního momentu na radiálním vychýlení motoru (při  $I_n$ ,  $n_n$  a  $\beta = 90^\circ$ )**

## 5.5 Tepelný výpočet

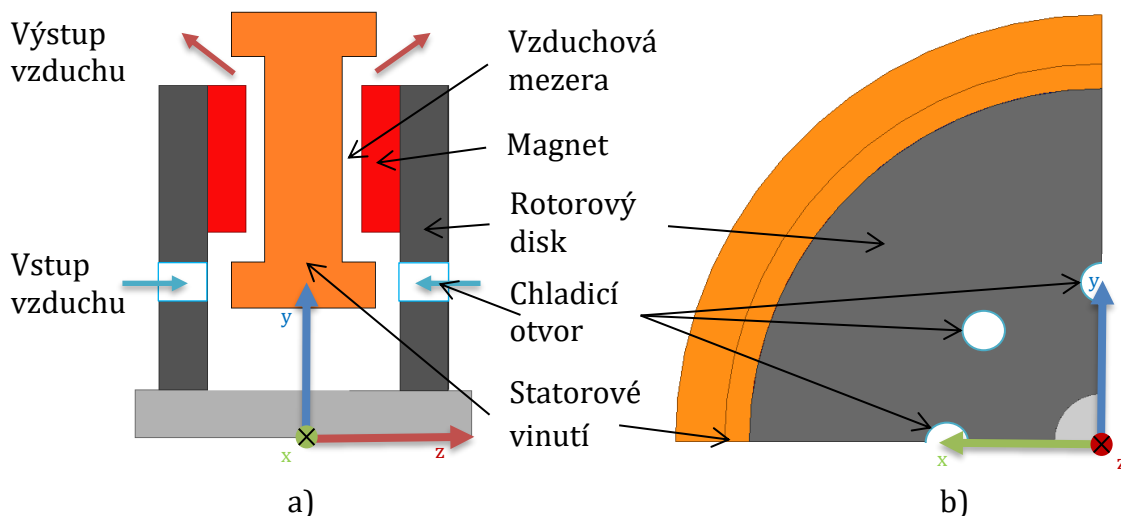
Provozem elektrického stroje dochází ke generaci tepla vlivem elektrických, magnetických a rotačních ztrát. Pro zajištění co možná nejdelší životnosti musí být vzniklé teplo účinně odváděno. Jakákoliv část stroje nesmí překročit svoje dovolené maximální oteplení. Zvýšené tepelné namáhání způsobuje degradaci izolací, mazacích prostředků případně permanentních magnetů. Vedle snížení životnosti stroje, dochází dále ke zvyšování Joulových ztrát rostoucím elektrickým odporem.

Stroje s axiálním magnetickým tokem mají poměrně velký objem vzduchové mezery (mnohdy obsahují několik vzduchových mezer). Obecně diskové stroje dosahují lepších ventilačních kapacit než stroje radiální. Přenos tepla může probíhat kombinací procesů vedení (kondukce), sálání (radiace) a proudění (konvekce).

Navrhovaný motor je předurčen pro činnost v čerpadle. V běžném provozním stavu bude samotný motor obklopen čerpanou kapalinou (viz kapitola 4 pojednávající o koncepci bezucpávkového čerpadla). V průběhu přechodných stavů nemusí čerpané médium skříň čerpadla zcela vyplňovat (např.: počáteční nasávací děj, zavzdušnění, vyčerpání média). V případě stroje obklopeného kapalinou je samotné teplo účinně odváděno pomocí vedení a proudění. Nehybný vzduch je dobrou tepelnou izolací. V případě stavu čerpadlové skříně bez čerpaného média se předpokládá pohyb vzduchu od rotujících komponentů (oběžné kolo, rotory magnetický ložisek).

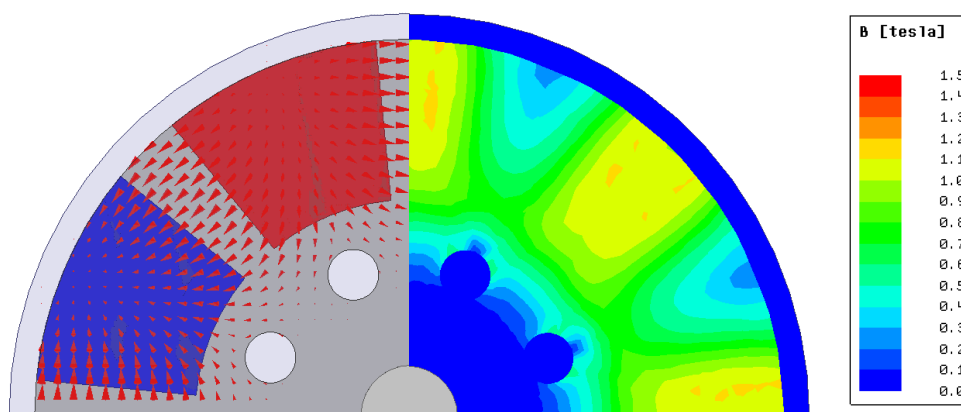
### 5.5.1 Stanovení vstupních podmínek výpočtu

Počáteční zkoušky samotného motoru budou probíhat bez přítomnosti vody. Z tohoto důvodu byly jednotlivé teplotní poměry řešeny výhradně při činnosti motoru chlazeného proudícím vzduchem. V tepelném výpočtu je uvažován stroj s dvěma rotorovými disky, neboť zkoušky budou probíhat **bez oběžného kola**.



Obr. 53: Uvažovaný model pro tepelnou analýzu a) řez, b) boční pohled – ¼

Proudění vzduchu do motoru bude během zkoušek čerpadla podpořeno pomocí děr ve spodním průměru rotorových disků (viz Obr. 53). Každý rotorový disk bude obsahovat 8 chladicích děr  $n_{chl}$  o průměru  $D_{chl}$  10 mm. Poloha ventilačních kanálů od osy rotace  $R_{pch}$  je 30 mm. Rychlost proudění vzduchu  $v_{air}$  byla zvolena na základě odborné konzultace na Ústavu mechaniky těles na FSI VUT v Brně. Teplota okolí  $v_0$  byla zvolena na normami uvažovanou maximální teplotu v průmyslovém prostředí. Hodnoty zvolených parametrů se nachází v Tab. 16.



**Obr. 54: Sycení rotorového disku s ventilačními otvory**

Pro ověření, zda chladicí díry neovlivní sycení rotorových disků, bylo zobrazeno rozložení magnetické indukce spolu s vektory ve střední rovině rotorového disku (viz Obr. 54). Vzhledem k umístění chladicích otvorů do spodního průměru není sycení zásadně ovlivněno.

**Tab. 16: Zvolené parametry pro tepelný výpočet**

| $v_{chl}$<br>[m·s <sup>-1</sup> ] | $n_{chl}$<br>[-] | $D_{chl}$<br>[mm] | $R_{pch}$<br>[mm] | $v_0$<br>[°C] |
|-----------------------------------|------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| 1,5                               | 8                | 10                | 30                | 40            |

Uvažované rozměry motoru při tepelném výpočtu jsou uvedeny v Tab. 17. Ztrátové parametry byly na základě příslušných vztahů přepočítávány podle daných provozních podmínek (otáčky, proud, teplota): Joulovy ztráty ve satorovém vinutí  $\Delta P_{j1}$  (viz rovnice v příloze 1), vířivé ztráty ve vinutí satoru  $\Delta P_e$  (viz rovnice v příloze 1) a mechanické rotační ztráty  $\Delta P_{rot}$  (rovnice (5.18)).

**Tab. 17: Rozměry motoru uvažované při tepelném výpočtu**

| $D_o$<br>[mm]                | $D_i$<br>[mm] | $h_r$<br>[mm] | $h_g$<br>[mm] | $\alpha_{PM}^*$<br>[-] |
|------------------------------|---------------|---------------|---------------|------------------------|
| 148                          | 85,4          | 10            | 4             | 0,756                  |
| * velikost viz popis v textu |               |               |               |                        |

V případě rotačních ztrát je nezbytné zohlednit provoz motoru na vzduchu (v ostatních kapitolách je uvažován motor ponořený do čerpané kapaliny). Pro výpočet ventilačních (rotačních) ztrát pro malé vnější průměry motorů je možné dle

literatury [1] využít soustavu tří vztahů (5.18) až (5.20). Výpočet ventilačních ztrát byl zapsán společně s tepelným výpočtem do zdrojového kódu pro software Matlab (viz příloha 5).

$$\Delta P_{rot} = \frac{1}{2} \cdot c_f \cdot \rho_{air} \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \right)^3 \cdot \left( \frac{D_o^5}{2} - \frac{D_h^5}{2} \right) \quad (5.18)$$

V rovnici (5.18) symbol  $c_f$  značí součinitel odporu pro turbulentní proudění a vyjádří se rovnicí (5.19). Dále  $n$  je počet otáček motoru za minutu.

$$c_f = \frac{3,87}{\sqrt{Re_{cf}}} \quad (5.19)$$

Neznámá hodnota Reynoldsova čísla  $Re_{cf}$  ve vztahu (5.19) se určí vztahem (5.20). Kde  $\rho_{air}$  je hustota vzduchu (pro vzduch při 40 °C a atmosférickém tlaku nabývá hodnoty 1,11 kg·m<sup>-3</sup> dle [47]) a  $\eta_{dair}$  je dynamická viskozita vzduchu (pro vzduch při 40 °C a atmosférickém tlaku nabývá hodnoty 1,92·10<sup>-5</sup> Pa·s dle [47]).

$$Re_{cf} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \cdot \frac{\rho_{air} \cdot D_o^2}{4 \cdot \eta_{dair}} \quad (5.20)$$

Z pohledu proudění vzduchu jsou rotorové permanentní magnety uvažovány o pólovém krytí 1. Naopak z pohledu přestupu tepla zářením je uvažováno skutečné pólové krytí 0,756. Při tepelných výpočtech se neuvažuje změna vlastností magnetů s teplotou (vlastnosti vypočteny pro teplotu magnetu 40 °C).

V průběhu tepelného výpočtu se zanedbává změna vlastností vzduchu s teplotou: hustota, dynamická a kinematická viskozita, Prandtlovo číslo, měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku a tepelná vodivost vzduchu.

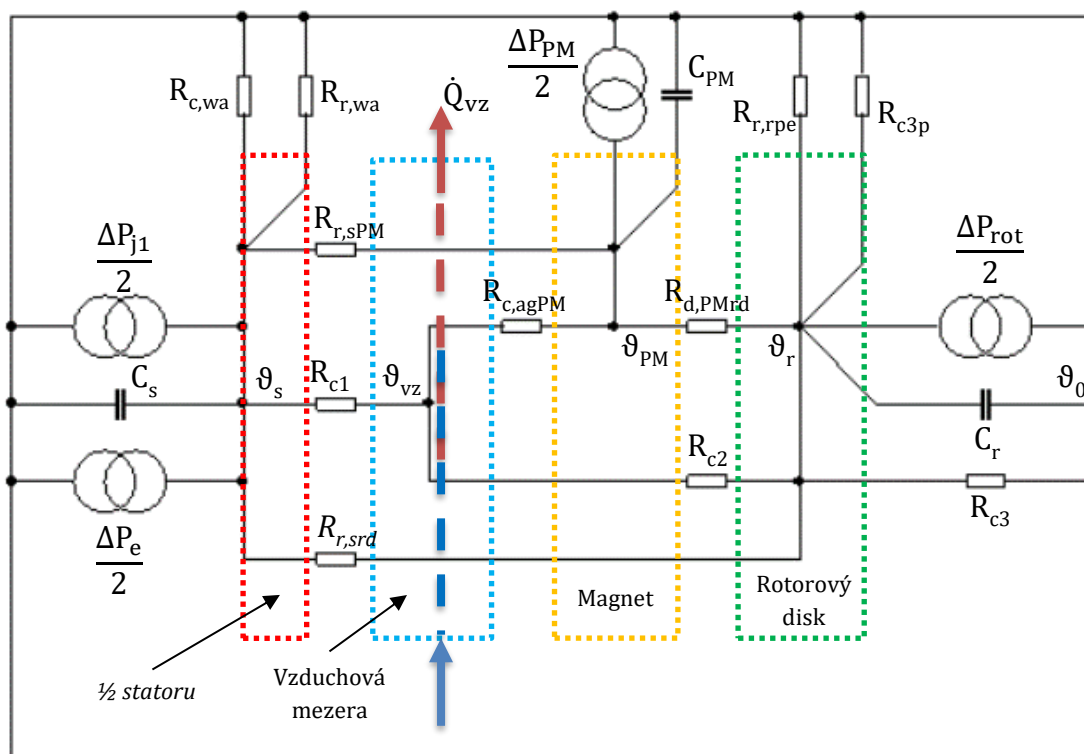
## 5.5.2 Celková tepelná síť motoru s bezželezným statorem

Tepelný obvod představuje určitou analogii k obvodu elektrickému. Tepelný tok (analogie k elektrickému proudu) je dán teplotním rozdílem (analogie k rozdílu potenciálů – elektrickému napětí) vznikajícím na tepelných odporech (analogie k odporu elektrickému).

V případě řešení ustáleného stavu se tepelný obvod skládá z tepelných odporů a zdrojů tepla připojených mezi uzly jednotlivých komponentů stroje. Pro zachycení dějů při přechodné analýze je nutné obvod doplnit o tepelné kapacity, které se využívají ke změně vnitřní energie s časem. Předpokladem většiny tepelných schémat je rovnoměrné rozložení teploty v každé řešené části (předpokládá se nekonečná tepelná vodivost vnitřní struktury materiálů).

Axiální motor s vnitřním bezželezným statorem představuje z pohledu teplotní sítě symetrii v rovině xy (viz Obr. 53). Lze tedy analyzovat pouze polovinu stroje. V takovém případě musí být započítána pouze poloviční velikost ztát.

Celkové tepelné schéma motoru s vnitřním bezželezným statorem v případě chlazení proudícím vzduchem se nachází na Obr. 55. Uspořádání bylo převzato z literatury [2]. Tepelná síť odpovídá systematicky Obr. 53.



Obr. 55: Celkové tepelné schéma motoru s bezželezným statorem chlazeným proudícím vzduchem (upraveno z [2])

Schéma je přehledně rozděleno do čtyř částí: 1/2 statoru, vzduchová mezera, permanentní magnety a rotorový disk. Dále bude vysvětlen význam jednotlivých symbolů uvedených v celkové tepelné síti.

Tepelnými zdroji jsou:

- Joulovy ztráty ve statorovém vinutí  $\Delta P_{1j}$ ,
- vířivé ztráty ve vinutí statoru  $\Delta P_e$ ,
- ztráty v permanentních magnetech  $\Delta P_{PM}$ ,
- rotační ztráty  $\Delta P_{rot}$ .

Tepelné kapacity se zde nachází celkem tři:

- tepelná kapacita statoru  $C_s$ ,
- tepelná kapacita magnetů  $C_{PM}$ ,
- tepelná kapacita rotoru  $C_r$ .

Teplo se ze statoru odvádí za pomoci pětice tepelných odporů<sup>2</sup>:

- prouděním mezi čelami cívek a vnějším prostředím  $R_{c,wa}$ ,

<sup>2</sup> Tepelné odpory přestupu tepla jsou indexovány následovně: tepelný odpor **prouděním** „c“, tepelný odpor **záření** „r“, tepelný odpor **vedením** „d“.

- zářením z čel cívek do vnějšího prostředí  $R_{r,wd}$ ,
- zářením ze statoru do permanentních magnetů  $R_{r,sPM}$ ,
- zářením ze statoru do rotorového disku  $R_{r,srd}$ ,
- prouděním mezi statorem a vzduchovou mezerou  $R_{c1}$ .

Teplo se ze vzduchové mezery odvádí za pomoci:

- tepelného odporu prouděním: vzduchová mezera – magnety  $R_{c,agPM}$ ,
- tepelného odporu prouděním: vzduchová mezera – rotorový disk  $R_{c2}$ ,
- tepelného toku chladicího vzduchu  $\dot{Q}_{vz}$ , procházejícího vzduchovou mezerou, jehož velikost je závislá na rozdílu výstupní a vstupní teploty vzduchu.

Teplo se z permanentních magnetů odvádí za pomoci tepelného odporu:

- vedením mezi permanentními magnety a rotorovým diskem  $R_{d,PMrd}$ .

Teplo se z rotoru odvádí za pomoci trojice tepelných odporů:

- zářením z vnějšího obvodu rotorového disku do vnějšího prostředí  $R_{r,rpe}$ ,
- prouděním mezi vnější plochou rotorového disku a prostředím  $R_{c3}$ .
- prouděním mezi vnějším obvodem rotorového disku a prostředím  $R_{c3p}$ ,

Hledané teploty v uzlových bodech tepelného schématu jsou:

- teplota statoru  $u_s$ ,
- teplota vzduchové mezery  $u_{vz}$ ,
- teplota permanentních magnetů  $u_{PM}$ ,
- teplota rotorového disku  $u_{rd}$ .

### 5.5.3 Zjednodušená tepelná síť motoru

Cílem kapitoly 5.5 není řešení přechodných tepelných dějů v navrhovaném motoru, naopak pouze výpočet výsledných ustálených teplot. Smyslem tedy je ověřit oteplení v určitých částí stroje a není tedy příliš důležitá přesnost výpočtu. Z tohoto důvodu bude pro výpočet teplot navrhovaného motoru namísto komplexního celkového tepelného schématu využít pouze zjednodušený tepelný model nacházející se na Obr. 56. Zjednodušené tepelné schéma bylo představeno rovněž v literatuře [2].

Zjednodušené tepelné schéma je odvozeno z celkového tepelného schématu na Obr. 55. Základní myšlenkou je opět teplotní symetričnost stroje v rovině  $xy$ . Zjednodušené tepelné schéma uvažuje pouze přestup tepla prouděním a sáláním. Teplota magnetů a rotorového disku se uvažuje shodná vzhledem k dobré tepelné vodivosti přechodu magnet – rotorový disk. V případě tepelných zdrojů byly zanedbány tepelné ztráty v permanentních magnetech. Ostatní zdroje tepla jsou shodné s kapitolou 5.5.2.

Teplo se ze statoru odvádí za pomoci dvojice tepelných odporů:

- odporem záření ze statoru do rotoru  $R_{r1}$ ,
- prouděním mezi statorem a vzduchovou mezerou  $R_{c1}$ .

Teplo se ze vzduchové mezery odvádí za pomoci:

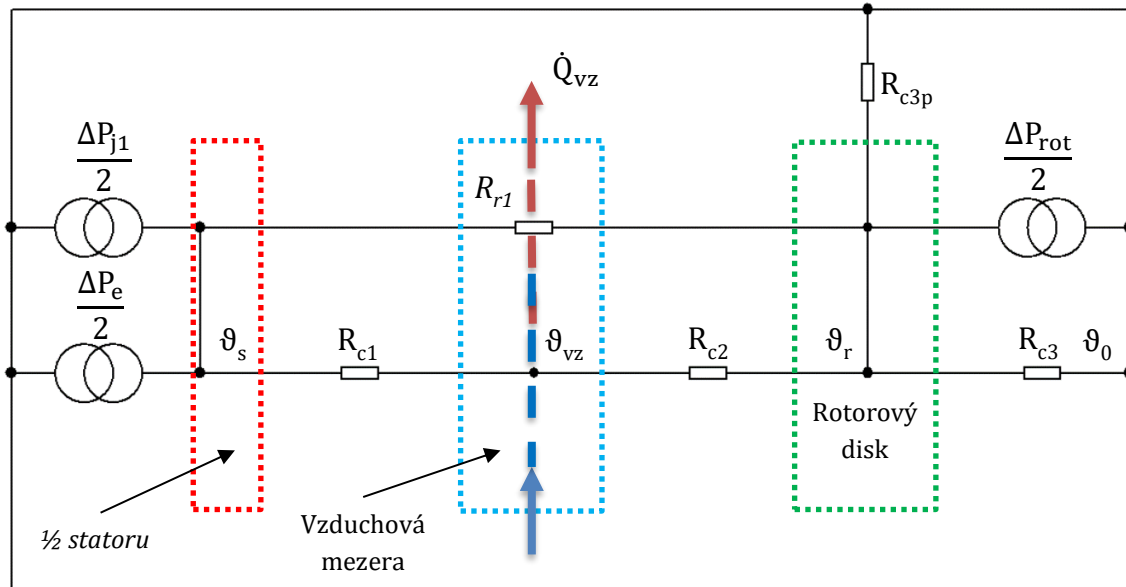
- tepelného odporu prouděním mezi vzduchovou mezerou a rotorem  $R_{c2}$ ,
- tepelného toku chladicího vzduchu  $\dot{Q}_{vz}$ , procházejícího vzduchovou mezerou, jehož velikost je závislá na rozdílu výstupní a vstupní teploty vzduchu.

Teplo se z rotoru odvádí za pomoci dvojice tepelných odporů:

- prouděním mezi vnější plochou rotorového disku a prostředím  $R_{c3}$ .
- prouděním mezi vnějším obvodem rotoru a prostředím  $R_{c3p}$ ,

Hledané teploty v uzlových bodech tepelného schématu jsou:

- teplota statoru  $\vartheta_s$ ,
- teplota vzduchové mezery  $\vartheta_{vz}$ ,
- teplota rotoru  $\vartheta_r$ .



**Obr. 56: Zjednodušená tepelná síť axiálního stroje s bezželezným statorem (upraveno z [2])**

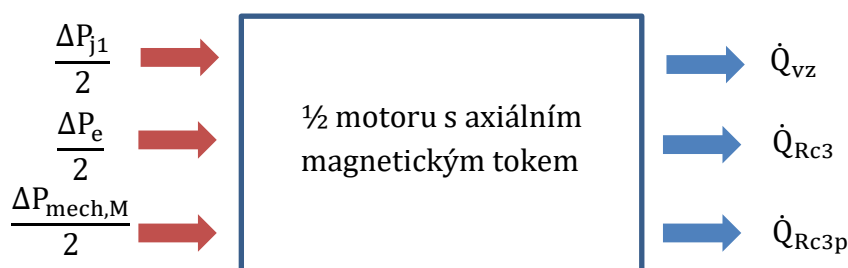
Soubor výpočtových rovnic použitých při řešení se nachází s patřičným popisem v příloze 2. Koncepce výpočtu je následující. Nejprve se určí neznámé hodnoty tepelných odporů. V dalším kroku je sestavena trojice lineárních rovnic, která je vyřešena pomocí iterativní Gauss-Seidlovy metody zapsané do software Matlab (viz příloha 5).

Odpor záření a tepelný tok ve vzduchové mezeře jsou při každé iteraci přepočítávány, neboť jejich hodnota silně závisí na teplotě. Výsledný maticový zápis pro řešení teplot jednotlivých částí stroje, sestavený na základě zjednodušeného tepelného schématu z Obr. 56, je uveden v rovnici (5.21). Samotným oteplením stroje při různých provozních podmínkách se zabývá kapitola 5.5.6.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_{c1}} + \frac{1}{R_{r1}} & -\frac{1}{R_{c1}} & -\frac{1}{R_{r1}} \\ \frac{1}{R_{c1}} & -\left(\frac{1}{R_{c1}} + \frac{1}{R_{c2}} + \dot{Q}_{vz}\right) & \frac{1}{R_{c2}} \\ \frac{1}{R_{r1}} & \frac{1}{R_{c2}} & -\left(\frac{1}{R_{c2}} + \frac{1}{R_{r1}} + \frac{1}{R_{c3}} + \frac{1}{R_{c3p}}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_s \\ v_{vz} \\ v_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cdot (\Delta P_{j1} + \Delta P_e) \\ -\dot{Q}_{vz} \cdot v_0 \\ -\left(\frac{1}{2} \Delta P_{rot} + \left(\frac{1}{R_{c3}} + \frac{1}{R_{c3p}}\right) v_0\right) \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

### 5.5.4 Zpětné výpočetní ověření zjednodušené tepelné sítě

Validitu tepelného výpočtu řešeného iteračně je vhodné zpětně ověřit. V případě tepelných výpočtů musí v každém časovém okamžiku platit první termodynamický zákon. Z jehož znění vyplývá, že energie v soustavě nemůže spontánně vznikat ani zanikat [45].



**Obr. 57: Tepelné toky vstupujících a vystupujících z 1/2 motoru**

Na Obr. 57 se nachází znázornění vstupních a výstupních toků, které vstupují případně vystupují z 1/2 navrhovaného axiálního motoru. Kde  $\dot{Q}_{vz}$  značí zmíněný tepelný tok ve vzduchové mezeře,  $\dot{Q}_{RC3}$  je tepelný tok vystupující z vnější plochy rotorového disku a  $\dot{Q}_{RC3p}$  je tepelný tok vystupující z pláště rotoru. Jednotlivé velikosti toků se určí na základě vztahů (5.22) až (5.24).

$$\dot{Q}_{vz} = 2 \cdot \dot{m}_{vz} \cdot c_p \cdot (v_{vz} - v_0) \quad (5.22)$$

$$\dot{Q}_{RC3} = \frac{\vartheta_r - \vartheta_0}{R_{c3}} \quad (5.23)$$

$$\dot{Q}_{RC3p} = \frac{\vartheta_r - \vartheta_0}{R_{c3p}} \quad (5.24)$$

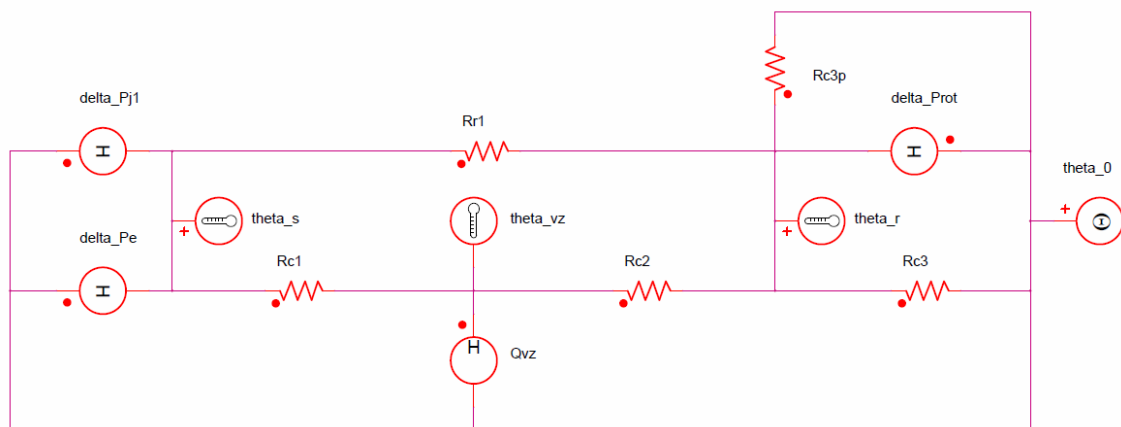
Pomocí I. termodynamického zákona lze zapsat rovnici (5.25), kde součet tepelných toků vstupujících (tepelné zdroje) a vystupujících musí být navzájem roven. Zmíněné ověření bylo zapsáno společně s ostatními rovnicemi tepelného výpočtu do software Matlab (viz příloha 5). Vlivem nastavení požadované přesnosti iterací není rozdíl pravé a levé strany rovnice nulový. Hodnota rozdílu se při výpočtech pohybovala v řádu  $10^{-4}$  W.

$$\frac{\Delta P_{j1}}{2} + \frac{\Delta P_e}{2} + \frac{\Delta P_{rot}}{2} = \dot{Q}_{vz} + \dot{Q}_{RC3} + \dot{Q}_{RC3p} \quad (5.25)$$

Další ověření bylo provedeno číselným dosazením do základních rovnic uvedených v maticovém zápisu (5.21). V tomto případě se rozdíl pravých a levých stran při výpočtech pohyboval v rozmezí  $10^{-5}$  W až  $10^{-4}$  W.

### 5.5.5 Ověření výpočetní sítě pomocí ANSYS Simplorer

ANSYS Simplorer je účinný software v oblasti řešení obvodů nejen elektrického charakteru. Obsahuje implementované knihovny se specifickými prvky pro sestavování schémat: elektrických, hydraulických, magnetických, tepelných. Jsou zde k nalezení takřka veškeré systémy, které nabývají určité analogie s obvody elektrickými. V případě řešení komplexních úloh je možné využít vzájemného propojení mezi softwarem Maxwell a Simplorer. Dané propojení bylo například využito při návrhu řízení aktivního magnetického ložiska pro bezúčpávkové čerpadlo ve zdroji [32].



**Obr. 58: Zjednodušená tepelná síť zhotovená v software ANSYS Simplorer**

Za účelem doplňujícího ověření validity výsledných teplot byla na základě tepelného schématu na Obr. 56 vytvořena v software Simplorer shodná teplotní síť (viz Obr. 58). V tepelném modelu se nachází celkem čtveřice prvků: zdroje tepelného toku („Heat Flow Source“), tepelné rezistory („Thermal Resistance“), zdroje teploty („Temperature Source“) a teplotní sondy („Thermometer“). Popis jednotlivých prvků na Obr. 58 odpovídá značení veličin ve zbytku této práce.

Hodnoty tepelných odporů pro jednotlivé teplotní rezistory byly vypočteny na základě rovnic v příloze 2. Tepelný tok ve vzduchové mezeře byl vyřešen vložení zdroje tepelného toku v záporném smyslu do uzlového bodu mezi teplotní rezistory „Rc1“ a „Rc2“ (kruhový symbol u značky zdroje tepelného toku značí jeho orientaci).

Hlavním smyslem této kapitoly bylo pouze ověření správné funkčnosti iteračního výpočtu. Hodnota tepelného toku ve vzduchové mezeře byla vypočtena pomocí vzorce (5.22). Při výpočtu tepelného toku v mezeře společně s tepelným odporem záření je předpokladem pro vlastní výpočet znalost výsledného oteplení. Popsaný postup ověření výpočtu je pouze semianalytického charakteru. Rozdíl teplot získaných z analytického výpočtu a z ANSYS Simplorer se pohyboval v řádu  $10^{-4}$  °C.

## 5.5.6 Výpočet oteplení pro různé provozní podmínky

Vzhledem k uvažovaným úvodním zkouškám stroje na vzduchu, byla v rámci této podkapitoly provedena sada tepelných výpočtů při různých provozních stavech. Výpočty jsou založeny na zjednodušené tepelné síti z podkapitoly 5.5.3.

Tab. 18: Ztráty motoru při provozu na vzduchu

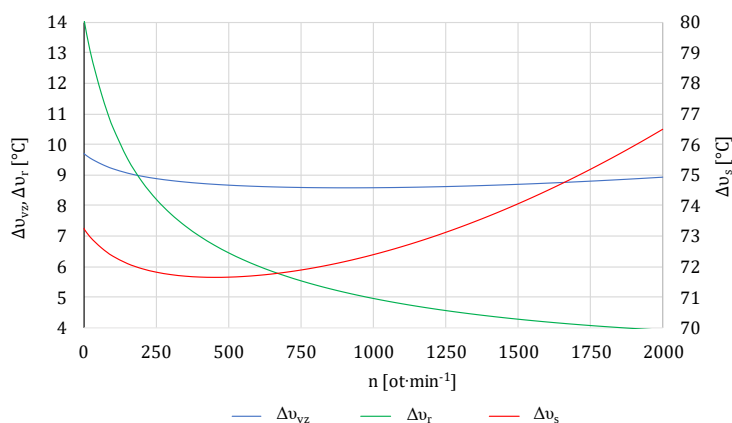
| Jmenovitý pracovní bod |              |                  | Maximální pracovní bod |              |                  |
|------------------------|--------------|------------------|------------------------|--------------|------------------|
| $\Delta P_{j1}$        | $\Delta P_e$ | $\Delta P_{rot}$ | $\Delta P_{j1}$        | $\Delta P_e$ | $\Delta P_{rot}$ |
| [W]                    | [W]          | [W]              | [W]                    | [W]          | [W]              |
| 46,7                   | 1,7          | 0,1              | 55,0                   | 1,8          | 0,1              |

Nejprve bylo řešeno výsledné oteplení motoru ve jmenovitém a maximálním pracovním bodě. V Tab. 18 jsou uvedeny ztráty ve jmenovitém a maximálním pracovním bodě. Výsledné oteplení statoru, vzduchové mezery a rotoru se pro dané pracovní body nachází v Tab. 19.

Tab. 19: Oteplení při chlazení motoru proudícím vzduchem

| Jmenovitý pracovní bod |                 |              | Maximální pracovní bod |                 |              |
|------------------------|-----------------|--------------|------------------------|-----------------|--------------|
| $\Delta v_s$           | $\Delta v_{vz}$ | $\Delta v_r$ | $\Delta v_s$           | $\Delta v_{vz}$ | $\Delta v_r$ |
| [°C]                   | [°C]            | [°C]         | [°C]                   | [°C]            | [°C]         |
| 73,8                   | 8,7             | 4,3          | 86,0                   | 10,1            | 5,1          |

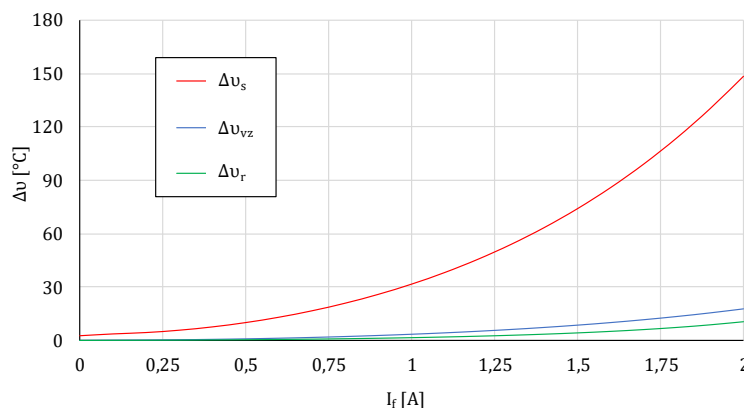
Dále bylo sledováno oteplení v závislosti na počtu otáček stroje při jmenovitém proudu a konstantní rychlosti proudícího vzduchu skrze chladicí otvory. Výsledné křivky jsou vyneseny v grafu na Obr. 59.



Obr. 59: Závislost oteplení motoru na velikosti otáček při jmenovitém proudu a rychlosti proudění vzduchu skrze chladicí otvory  $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Největší změna oteplení v rámci sledovaného rozsahu otáček nastala v rotoru. Tato skutečnost koresponduje se zjednodušenou tepelnou sítí. Odvod tepla z rotoru je založen na proudění do okolního prostředí. Dovolené oteplení rotoru je omezeno teplotní třídou permanentních magnetů. Teplotní třída permanentních magnetů v motoru je typu M. Provozní teplota této třídy je  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . V případě

překročení tzv. Curieovy teploty (pro zvolené magnety je tato teplota 310 °C) dochází k úplné demagnetizaci permanentního magnetu. V daném případě oteplení při uvedených podmínkách nedosáhne kritické hodnoty ani v případě zkoušky motoru nakrátko. Lokální minimum křivek statoru a vzduchové mezery je způsobeno změnou velikosti vířivých ztrát ve statoru při současné změně odvodu tepla z rotoru v závislosti na otáčkách stroje.



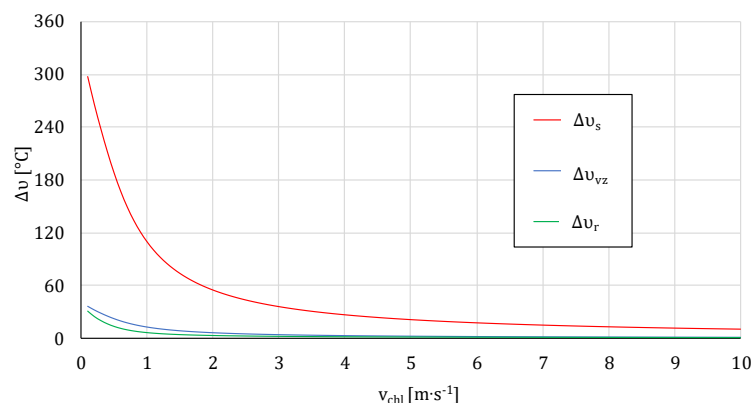
**Obr. 60: Závislost oteplení motoru na velikosti proudu při jmenovitém počtu otáček a rychlosti proudění vzduchu skrze chladicí otvory 1,5 m·s<sup>-1</sup>**

Na Obr. 60 se nachází grafická závislost oteplení na velikosti proudu při jmenovitém počtu otáček a rychlosti proudění vzduchu skrze chladicí otvory 1,5 m·s<sup>-1</sup>. Největší nárůst teploty nastává ve statoru. Dochází zde ke zvyšování Joulových ztrát druhou mocninou proudu a první mocninou změny odporu s teplotou (viz rovnice (36)). Oteplení vzduchové mezery a rotoru nedosáhne vzhledem k permanentním magnetům kritické hodnoty ani v případě proudu 2 A. Povolený nárůst teploty vinutí v případě izolace typu F<sup>3</sup> je překročen při hodnotě proudu 1,74 A, mezní teploty ve sledované proudovém rozsahu není dosaženo. Povolený nárůst teploty v případě izolace typu H<sup>4</sup> je překročen při proudu 1,87 A.

Množství vzduchu procházející vzduchovou mezerou je závislé na velikosti ventilačních otvorů v rotorovém disku a na vlastní rychlosti proudění. Platí zde nepřímá úměra, a sice s rostoucím průřezem chladicích otvorů je zapotřebí nižší rychlosti proudění pro dosažení stejného objemového průtoku. Na Obr. 61 je zobrazena grafická závislost oteplení v závislosti na rychlosti proudění skrze ventilační otvory při jmenovitém proudu, jmenovitých otáčkách a neměnném průřezu samotných ventilačních otvorů. Z průběhu je zřejmé, že při poklesu rychlosti proudění pod 1,5 m·s<sup>-1</sup> dochází k rapidnímu nárůstu oteplení. Vlivem rostoucí teploty statoru se silně projevuje přenos tepla zářením ze statoru do rotoru. Vlivem sníženého odvodu tepla v uzlu tepelných odporů  $R_{c1}$  a  $R_{c2}$  prostupuje do rotoru rovněž velká část tepla současně i prouděním.

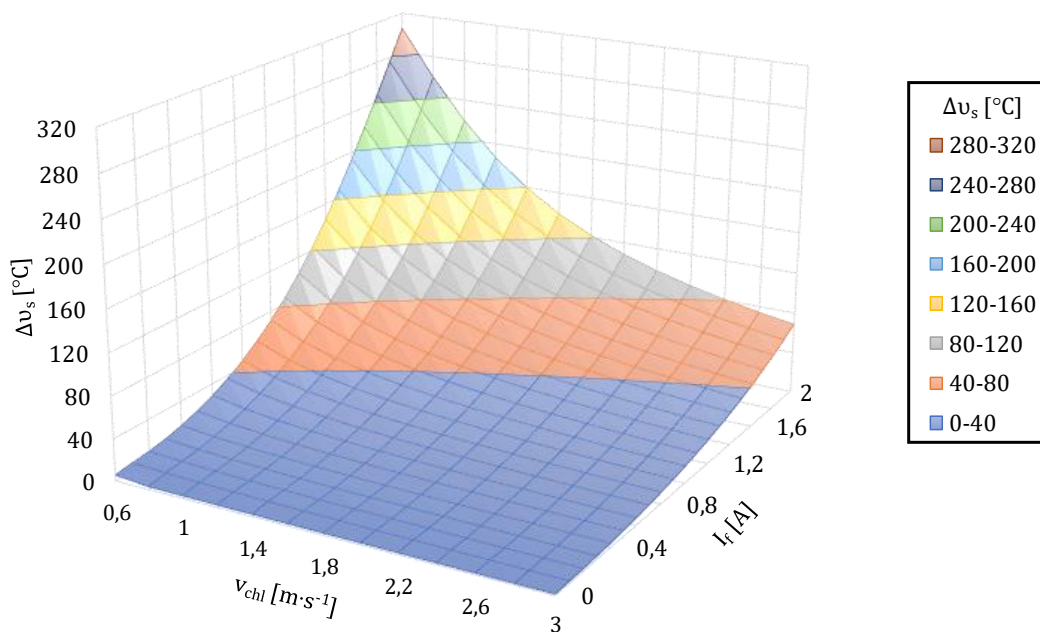
<sup>3</sup> Třída izolace F – povolený nárůst teploty: 105 °C (při 40 °C); mezní teplota: 155 °C [46]

<sup>4</sup> Třída izolace H – povolený nárůst teploty: 125 °C (při 40 °C); mezní teplota: 180 °C [46]



**Obr. 61: Závislost oteplení motoru na rychlosti proudění vzduchu přes chladicí otvory při jmenovitém proudu a jmenovitých otáčkách motoru**

Dále byla na Obr. 62 vytvořena prostorová závislost oteplení statoru na velikosti proudu a rychlosti proudění ventilačními otvory při jmenovitých otáčkách. Hodnoty oteplení statoru při rychlostech chladicího vzduchu okolo  $0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a velikosti proudu dosahujícímu 2 A jsou pouze teoretické.



**Obr. 62: Závislost oteplení statoru na velikosti proudu a rychlosti proudění vzduchu chladicími otvory při jmenovitých otáčkách motoru**

## 5.6 Souhrn parametrů navrženého motoru

V Tab. 20 se nachází souhrn základních parametrů navrženého axiálního motoru. Samotná tabulka je přehledně rozdělena do tří částí: obecná specifika, elektrické a mechanické parametry a mechanická specifika. V tabulce jsou uvedeny jak jmenovité, tak maximální hodnoty. Dále se zde nachází informace o vnějších rozměrech a hmotnosti a také doplňující informace o ložiskovém systému.

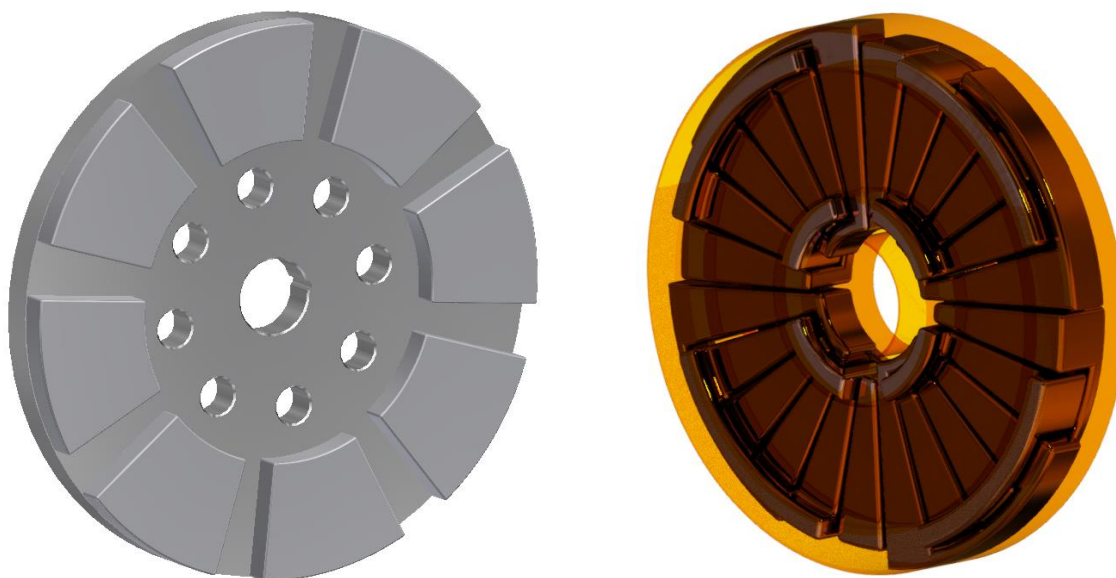
**Tab. 20: Souhrn parametrů navrženého axiálního motoru**

|                                   |                           |                          |                                                               |      |                         |
|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------|------|-------------------------|
| Obecná specifika motoru           | Počet fází                |                          | m                                                             | 3    | [-]                     |
|                                   | Počet pólů                |                          | 2p                                                            | 8    | [-]                     |
|                                   | Zapojení cívek            |                          | Y                                                             |      |                         |
| Elektrické a mechanické parametry | Jmenovité parametry       | Napájecí napětí          | $U_s$                                                         | 230  | [V]                     |
|                                   |                           | Otáčky                   | $n_n$                                                         | 1450 | [ot·min <sup>-1</sup> ] |
|                                   |                           | Frekvence                | $f_n$                                                         | 97   | [Hz]                    |
|                                   |                           | Moment                   | $M_n$                                                         | 3,2  | [N·m]                   |
|                                   |                           | Proud                    | $I_{fn}$                                                      | 1,5  | [A]                     |
|                                   |                           | Výkon                    | $P_2$                                                         | 490  | [W]                     |
|                                   | Motor bez ložisek         | Příkon                   | $P_{1m}$                                                      | 573  | [W]                     |
|                                   |                           | Účinnost                 | $\eta_m$                                                      | 86   | [%]                     |
|                                   | Soustava motoru s ložisky | Příkon                   | $P_{1c}$                                                      | 628  | [W]                     |
|                                   |                           | Účinnost                 | $\eta_c$                                                      | 78   | [%]                     |
|                                   | Maximální parametry       | Otáčky                   | $n_{max}$                                                     | 1500 | [ot·min <sup>-1</sup> ] |
|                                   |                           | Frekvence                | $f_{max}$                                                     | 100  | [Hz]                    |
|                                   |                           | Moment                   | $M_{max}$                                                     | 3,5  | [N·m]                   |
|                                   |                           | Proud                    | $I_{fmax}$                                                    | 1,6  | [A]                     |
| Mechanická specifika              | Celková hmotnost          |                          | m                                                             | 5,8  | [kg]                    |
|                                   | Vnější průměr stroje      |                          | $D_s$                                                         | 190  | [mm]                    |
|                                   | Délka stroje              |                          | $l_s$                                                         | 60   | [mm]                    |
|                                   | Ložiskový systém          | Typ                      | Magnetický                                                    |      |                         |
|                                   |                           | Soustava                 | 1x axiální ložisko - pasivní<br>2x radiální ložisko - aktivní |      |                         |
|                                   |                           | Příkon (aktivní ložiska) | $P_{loziska}$                                                 | 40   | [W]                     |

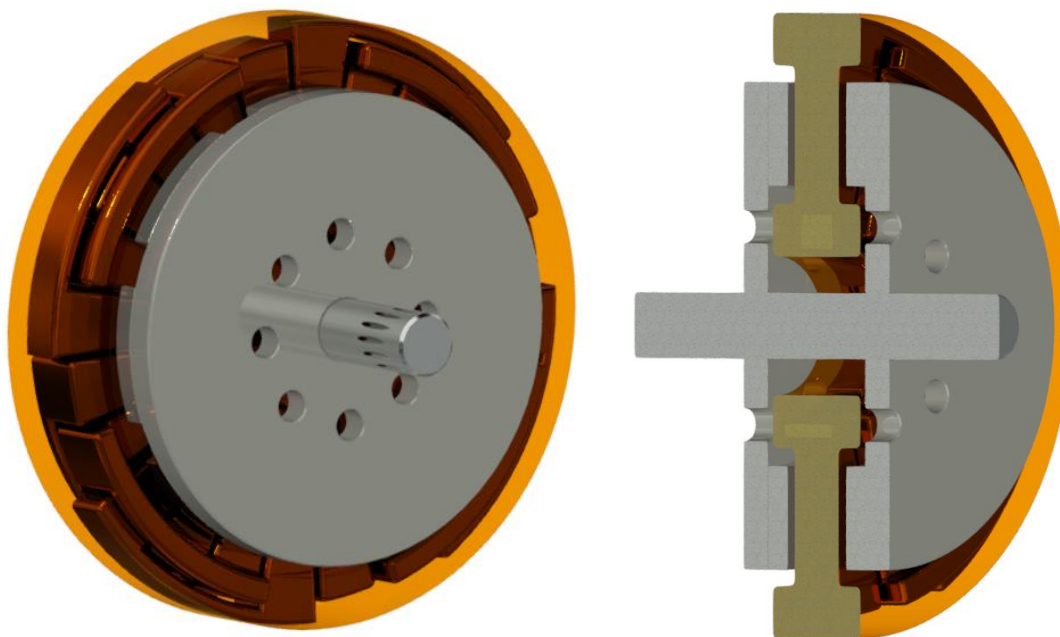
Velikost příkonu  $P_1$ , účinnost motoru  $\eta_m$  a účinnost soustavy motoru s ložisky  $\eta_c$  odpovídá výpočtům v kapitole 5.2.5. Tabulka je sestavena pro motor obklopený kapalinou (prostředí se vzduchem bylo uvažováno pouze při tepelném výpočtu v kapitole 5.5). Celková hmotnost  $m$  je uvedena včetně hmotnosti hřídele a dvojice rotorových disků (bez započtení hmotnosti ložiskového systému). Velikost délky stroje  $l_s$  je uvedena pro stroj s dvojicí rotorových disků (bez hřídele). Vnější průměr

stroje  $D_s$  je dán výškou čel vinutí, které přesahují nad vnější průměr rotorových disků  $D_o$ .

Z důvodů omezeného časového plánu a dlouhých dodacích lhůt jednotlivých komponent nebyla samotná výroba navrženého motoru provedena. Pro lepší představu navrženého stroje slouží Obr. 64 a Obr. 63. Statorové vinutí je vykresleno pouze zjednodušeně, v reálném stroji by bylo tvořeno smaltovanými vodiči.



Obr. 63: a) model rotoru, b) model statoru



Obr. 64: Model navrženého motoru a) kompletní sestava, b) ½ řez

# ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo navrhnout pohon pro bezucpávkové odstředivé čerpadlo řešené v rámci projektu TE02000232 pro Výzkumné centrum speciálních rotačních strojů. Vlastní konstrukce čerpadla vychází z patentu odboru Fluidního inženýrství Viktora Kaplana VUT v Brně, ze kterého rovněž plynulo užití motoru s axiálním magnetickým tokem přes vzduchovou mezeru. Tento typ strojů je specifický velkým poměrem výkonu k celkovému objemu a malými rozměry v podélném směru. Axiální stroje získaly uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu.

Navržený osmipólový motor je oboustranné struktury s vnitřním bezželezným statorem. Jmenovité parametry motoru jsou: otáčky  $n_n$  1450 ot·min<sup>-1</sup>, výkon  $P_1$  490 W a moment  $M_n$  3,2 N·m. Permanentní magnety na rotorech jsou typu N52M a vytváří konfigurace SJ. Oba rotorové disky jsou navrženy z konstrukční oceli s povrchovou úpravou galvanickým pokovením (ochrana proti korozi). Rotorový disk bude při aplikaci v čerpadle, na straně přilehlé k oběžnému kolu, nahrazen nosným diskem. Stator bude obsahovat rozložené vinutí s lichoběžníkovými cívkami zalitými do epoxidové pryskyřice.

Oběžné kolo spojené s motorem bude neseno prostřednictvím magnetického ložiskového systému. Ten tvoří dvojice aktivních radiálních ložisek společně s pasivním axiálním ložiskem. V této části diplomová práce navázala na práci bakalářskou. Součástí diplomové práce je i popis koncepce bezucpávkového čerpadla.

Parametry společně s rozměry motoru byly nejprve předběžně určeny pomocí analytických vztahů. Následně byl samotný model ověřován a upravován na základě sady provedených magnetických analýz metodou konečných prvků v software ANSYS Maxwell. Statickou analýzou bylo sledováno dosažení požadované střední hodnoty magnetické indukce ve statorovém vinutí 250 mT. Na základě výsledků byla zvýšena tloušťka permanentních magnetů z 5,7 mm na 7,7 mm a velikost pólového krytí změněna z 0,637 na 0,750. Pro poptávku výroby magnetů byla tloušťka zaokrouhlena na 8 mm a pólové krytí změněno na 0,756. Navazující transientní analýzou byla kontrolována velikost indukovaného napětí. Na jejím základě byl počet závitů připadajících na jednu fázi snížen o 19 %. Odchyly jsou způsobeny zejména rozptylovými magnetickými toky, které analytický výpočet neuvažuje.

Dále byly vytvořeny momentové charakteristiky v závislosti na zátěžném úhlu  $\beta$  pro různé velikosti proudů a oteplení permanentních magnetů. Maximální moment motoru při teplotě magnetů 80 °C poklesne oproti teplotě 20 °C o 1 N·m. V rámci transientní analýzy byla sledována také činnost motoru v případě vychýlení rotorů. Samotná činnost motoru je nejvíce ovlivněna při axiálním vychýlení, kdy

dochází k nelineárnímu nárůstu vnitřního momentu. Naopak žádná změna momentu se neprojeví při radiálním a úhlovém vychýlení.

Účinnost navrhovaného motoru ve jmenovitém pracovním bodě byla vypočtena na 86 %. Tato nižší účinnost se odvíjí od ztrát třením rotorů o okolní kapalinu v čerpadle. Účinnost při započtení elektrického příkonu a mechanických ztrát magnetického ložiskového systému poklesne na 78 %. Celkové ztráty soustavy činí téměř 100 W. Celkový příkon čerpadla při jmenovitém průtoku  $11 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  je 0,63 kW.

První zkušební testy motoru proběhnou při chlazení proudícím vzduchem. Pomocí tepelné sítě bylo vypočteno oteplení motoru pro různé provozní podmínky. V rotorových discích bylo navrženo 8 ventilačních kanálů. Uvažovaná rychlost vzduchu v těchto kanálech byla  $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ve jmenovitém pracovní bodě dosáhne stator oteplení  $74^\circ\text{C}$ , oteplení rotorů je pouze  $4^\circ\text{C}$  (teplota okolního vzduchu  $40^\circ\text{C}$ ). Dále byla provedena sada tepelných výpočtů v závislosti na: počtu otáček motoru, rychlosti proudění chladicího vzduchu a velikosti statorového proudu. Validita tepelného výpočtu byla ověřena tokovou metodou a semianalytickým výpočtem softwarem Simplorer.

V rámci diplomové práce byla provedena literární rešerše na téma konstrukce axiálních strojů a jejich aplikací v čerpadlech. Jednotlivé stroje jsou rozřazeny do příslušných podkapitol dle počtů statorů a rotorů.

# Literatura

- [1] HUZLÍK, R. Motor-generátor pro vírovou turbínu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 100 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
- [2] GIERAS, Jacek F., Rong-Jie. WANG a Maarten J. KAMPER. *Axial flux permanent magnet brushless machines*. 2. Boston: Kluwer, 2004. ISBN 14-020-2661-7.
- [3] FRANTIŠEK, Pochylý, Lapčík JOSEF, Fialová SIMONA a Laníček TOMÁŠ. *Bezucpávkové odstředivé čerpadlo s integrovaným diskovým motorem*. 2007. Česká republika. CZ 300147 B6. Přihlášeno 10.5.2007. Uděleno 15.1.2009. Zapsáno 3.9.2007. Dostupné také z: <http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0017/uv017818.pdf>
- [4] PARVIAINEN, Asko. Design of axial-flux permanent-magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology, 2005. ISBN 95-221-4030-9.
- [5] NEETHU, S., K.S. SHINOY a A. S. SHAJILAL. Novel design, optimization and realization of axial flux motor for implantable blood pump. *2010 Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems* [online]. IEEE, 2010, **2010**, 1-6 [cit. 2017-11-03]. DOI: 10.1109/PEDES.2010.5712458. ISBN 978-1-4244-7782-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5712458/>
- [6] BŘEZINA, Tomáš, ed. *Simulation modelling of mechatronic systems III*. 3. Brno: Faculty of Mechanical Engineering, University of Technology, c2007. Mechatronics. ISBN 978-80-214-3559-9.
- [7] GUO-JHIH YAN, LIANG-YI HSU, JING-HUI WANG, MI-CHING TSAI a XIN-YI WU. Axial-Flux Permanent Magnet Brushless Motor for Slim Vortex Pumps. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2009, **45**(10), 4732-4735 [cit. 2017-11-03]. DOI: 10.1109/TMAG.2009.2022499. ISSN 0018-9464. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5257240/>
- [8] ANDRIOLLO, M., G. BETTANINI a A. TORTELLA. Design procedure of a small-size axial flux motor with Halbach-type permanent magnet rotor and SMC cores. *2013 International Electric Machines* [online]. IEEE, 2013, **2013**, 775-780 [cit. 2017-11-03]. DOI: 10.1109/IEMDC.2013.6556181. ISBN 978-1-4673-4974-1. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6556181/>

- [9] GIULII CAPPONI, Fabio, Giulio DE DONATO a Federico CARICCHI. Recent Advances in Axial-Flux Permanent-Magnet Machine Technology. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. 2012, **48**(6), 2190-2205 [cit. 2017-11-03]. DOI: 10.1109/TIA.2012.2226854. ISSN 0093-9994. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6352898/>
- [10] AYDIN, M., S. HUANG a T.A. LIPO. Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review. *Research Gate* [online]. **2004** [cit. 2017-11-03]. Dostupné z: [http://lipo.ece.wisc.edu/2004pubs/2004\\_10.pdf](http://lipo.ece.wisc.edu/2004pubs/2004_10.pdf)
- [11] KAMPER, M.J., RONG-JIE WANG a F.G. ROSSOUW. Analysis and Performance of Axial Flux Permanent-Magnet Machine With Air-Cored Nonoverlapping Concentrated Stator Windings. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. 2008, **44**(5), 1495-1504 [cit. 2017-11-04]. DOI: 10.1109/TIA.2008.2002183. ISSN 0093-9994. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4629361/>
- [12] OKADA, Y., N. YAMASHIRO, K. OHMORI, T. MASUZAWA, T. YAMANE, Y. KONISHI a S. UENO. Mixed Flow Artificial Heart Pump With Axial Self-Bearing Motor. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* [online]. 2005, **10**(6), 658-665 [cit. 2017-11-04]. DOI: 10.1109/TMECH.2005.859827. ISSN 1083-4435. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1556569/>
- [13] PRUŠA, R. *Návrh magnetického ložiska pro čerpadlo*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 74 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.
- [14] *GaussBoys Super magnets* [online]. 2012 [cit. 2015-11-01]. Dostupné z: <http://www.gaussboys.com/store/index.php/magnet-information/halbach-array-info.html>
- [15] Bezucpávková čerpadla s magnetickým pohonem HMD Kontro. *LEWA: Creating Fluid Solutions* [online]. [cit. 2017-11-04]. Dostupné z: <http://www.lewa.cz/cs/cerpadla/odstrediva-cerpadla/hmd-kontro/>
- [16] Principy průmyslových čerpadel: 4.díl – odstředivá čerpadla. *Automatizace.hw.cz: rady a poslední novinky z oboru* [online]. 2011 [cit. 2017-11-04]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz//principy-prumyslovych-cerpadel-4dil-odstrediva-cerpadla>
- [17] Design of electric machines: Axial flux machines. *Electric Energy Magazine* [online]. 2013, (4) [cit. 2017-11-04]. Dostupné z:

<http://www.mondragon.edu/en/phs/research/research-teams/electrical-energy/electric-energy-folder/newsletters/no-4-january-june>

- [18] PARVIAINEN, Asko. *Design of axial-flux permanent-magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines* [online]. Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology, 2005 [cit. 2017-11-04]. ISBN 95-221-4030-9. Dostupné z: <http://studylib.net/doc/18050503/design-of-axial-flux-permanent-magnet-low-speed-machines>
- [19] *Sparkmuseum: Early radio and scientific apparatus* [online]. [cit. 2017-11-04]. Dostupné z: <http://www.sparkmuseum.com/MOTORS.HTM>
- [20] YASA P400 Series Motor. *OEM: Off-Highway* [online]. 2015 [cit. 2017-11-04]. Dostupné z: <https://www.oemoffhighway.com/electronics/powersystems/electric-motors/electrical-electroniccomponents/product/12117277/yasa-motors-yasa-p400-series-motor>
- [21] Elektricky vodivé materiály. *Elektrotechnické materiály I* [online]. VOŠ a SPŠ elektrotechnická Františka Křižíka, 2016 [cit. 2017-11-06]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/04.html>
- [22] J. F. Gieras, M. Wing, *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*, Second Edition. CRC Press, 2002, p. 616.
- [23] N52M. *Arnold: Magnetics Technologies* [online]. 770 Linden Avenue, Rochester, NY 14625 USA [cit. 2017-11-11]. Dostupné z: <http://www.arnoldmagnetics.com/Portals/0/Files/Catalogs%20and%20Lit/Neo/151021/N52M%20-%20151021.pdf?ver=2015-12-07-103802-840>
- [24] *Getty Images: First Electric Generator, Faraday Disk* [online]. 2016 [cit. 2017-11-12]. Dostupné z: <http://media.gettyimages.com/photos/view-of-research-laboratory-apparatus-similar-to-the-type-electric-picture-id167160597>
- [25] Konstrukce uložení ložisek: Posouzení provedení. *SKF* [online]. [cit. 2017-11-12]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/ball-bearings/angular-contact-ball-bearings/single-row-angular-contact-ball-bearings/design-considerations/index.html>
- [26] DONCKER, Rik de, Duco W. J. PULLE a André VELTMAN. *Advanced electrical drives: analysis, modeling, control*. Dordrecht: Springer, c2011. Power systems. ISBN 978-94-007-0179-3.

- [27] HAQUE, Enamul a M. RAHMAN. Permanent Magnet Synchronous Motor Drives: Analysis, Modeling and Control. VDM Verlag, 2009. ISBN 9783639191035.
- [28] *Magmax: Motor/Generator Technology* [online]. [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: <https://www.magnax.com>
- [29] HSU, John a Donald ADAMS. Permanent magnet energy conversion machine with magnet mounting arrangement: US5952756 A. 1999. US5952756 A. Zapsáno 14. září 1999. Dostupné z: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US5952756.pdf>
- [30] M., Lukaniszyn a Wrobel R. Towards optimization of the disc type brushless dc motor by changing the stator core structure. *Proceedings of International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. Finland, 2000, 1357-1360.
- [31] Čerpadla s magnetickou spojkou. *WATEK: Výroba čisté a laboratorní vody se zárukou a tradicí* [online]. Ledec nad Sázavou [cit. 2017-11-16]. Dostupné z: <http://www.watek.cz/cs/cerpadla-s-magnetickou-spojkou>
- [32] STUCHLÝ, K. Simulační model levitačního magnetu a magnetického ložiska. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Rostislav Huzlík, Ph.D.
- [33] KNAP, Z. *Motor s axiálním magnetickým tokem pro přímý pohon čerpadla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Rostislav Huzlík Ph.D.
- [34] OMBACH, G. a J. JUNAK. Comparison of double-layer interior permanent magnet synchronous motor design with two different pole numbers. *2008 18th International Conference on Electrical Machines* [online]. IEEE, 2008, 1-6 [cit. 2017-11-19]. DOI: 10.1109/ICELMACH.2008.4799934. ISBN 978-1-4244-1735-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4799934/>
- [35] WANG, Xiaoyuan a Jingjuan DU. Performance Analysis of a Wedgy Airgap Disk Coreless Permanent Magnet Synchronous Motor. *2006 International Conference on Mechatronics and Automation* [online]. IEEE, 2006, 1811-1816 [cit. 2017-11-21]. DOI: 10.1109/ICMA.2006.257509. ISBN 1-4244-0465-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4026368/>
- [36] GIERAS, J.F. a I.A. GIERAS. Performance analysis of a coreless permanent magnet brushless motor. *Conference Record of the 2002 IEEE Industry*

- Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No.02CH37344)* [online]. IEEE, 2002, 2477-2482 [cit. 2017-11-21]. DOI: 10.1109/IAS.2002.1042794. ISBN 0-7803-7420-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1042794/>
- [37] TARAN, N., V. RALLABANDI a D. IONEL. A comparative study of coreless and conventional axial flux permanent magnet synchronous machines for low and high speed operation [online]. 2017, - [cit. 2017-11-21]. DOI: 10.1109/ECCE.2017.8095799. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8095799/>
- [38] NEETHU, S., S.P. NIKAM, A K WANKHEDE, Saumitra PAL a B.G. FERNANDES. High speed coreless axial flux permanent magnet motor with printed circuit board winding. *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* [online]. IEEE, 2017, 1-6 [cit. 2017-11-21]. DOI: 10.1109/IAS.2017.8101733. ISBN 978-1-5090-4894-6. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8101733/>
- [39] CARICCHI, F., F. CRESCIMBINI, F. MEZZETTI a E. SANTINI. Multistage axial-flux PM machine for wheel direct drive. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. **32**(4), 882-888 [cit. 2017-11-21]. DOI: 10.1109/28.511645. ISSN 00939994. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/511645/>
- [40] LOVATT, H.C. Design of an in-wheel motor for a solar-powered electric vehicle. *Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives* [online]. IEE, 1997, 234-238 [cit. 2017-11-21]. DOI: 10.1049/cp:19971074. ISBN 0852966962. Dostupné z: [http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp\\_19971074](http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp_19971074)
- [41] PALSOVICS, N. *Návrh generátoru s vestavěnou turbínou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Rostislav Huzlík, PhD.
- [42] PYRHONEN, Juha., Tapani JOKINEN a Valeria. HRABOVCOVÁ. *Design of rotating electrical machines*. Hoboken, NJ: Wiley, 2008. ISBN 978-047-0695-166.
- [43] Viskozita vody. *Vodovod* [online]. [cit. 2017-12-05]. Dostupné z: <http://vodovod.info/index.php/tabulky/177-viskozita-vody#.WiXQmkriZGM>
- [44] Hustota, kinematická viskozita a povrchové napětí v závislosti na teplotě. *ČVUT – FSV: katedra hydrauliky a hydrologie* [online]. ČVUT [cit. 2017-

- 12-05]. Dostupné z: [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HYAR/ke\\_stazeni/cviceni/laboratore/tabulky.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/HYAR/ke_stazeni/cviceni/laboratore/tabulky.pdf)
- [45] RAČEK, Jiří. *Technická mechanika: mechanika tekutin a termomechanika*. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky, 2004. ISBN 80-214-2598-9.
- [46] Třídy izolace. *Pohonná technika* [online]. [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/asynchronni-motor/tridy-izolace>
- [47] *Větrání a klimatizace*. 3., zcela přeprac. vyd. Brno: BOLIT-B Press, 1993. ISBN 80-901-5740-8.
- [48] ZHU, Z. Q. Recent Development of Halbach Permanent Magnet Machines and Applications. 2007 Power Conversion Conference – Nagoya. IEEE, 2007: K-9-K-16. DOI: 10.1109/PCCON.2007.372911 [cit. 2015-11-12]. ISBN 1-4244-0843-1. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4239126>

# Seznam symbolů, veličin a zkratek

| Symbol                 | Název                                                       | Jednotka             |
|------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------|
| $B$                    | indukce magnetického pole                                   | [T]                  |
| $B_{\max}$             | amplituda magnetické indukce ve vinutí                      | [T]                  |
| $B_{\text{PM}}$        | pracovní magnetická indukce permanentního magnetu           | [T]                  |
| $B_r$                  | remanentní magnetická indukce permanentního magnetu         | [T]                  |
| $B_{r20}$              | remanentní magnetická indukce při teplotě 20 °C             | [T]                  |
| $\mathbf{B}_x$         | vektor magnetické indukce ve směru osy $x$                  | [T]                  |
| $\mathbf{B}_y$         | vektor magnetické indukce ve směru osy $y$                  | [T]                  |
| $\mathbf{B}_z$         | vektor magnetické indukce ve směru osy $z$                  | [T]                  |
| $B_\delta$             | magnetická indukce ve vinutí                                | [T]                  |
| $B_{\delta\max}$       | maximální hodnota magnetické indukce ve vinutí              | [T]                  |
| $B_{\delta\text{str}}$ | střední magnetická indukce ve vinutí                        | [T]                  |
| $C_{\text{PM}}$        | tepelná kapacita permanentních magnetů                      | [J·K <sup>-1</sup> ] |
| $C_r$                  | tepelná kapacita rotorového disku                           | [J·K <sup>-1</sup> ] |
| $C_s$                  | tepelná kapacita statoru                                    | [J·K <sup>-1</sup> ] |
| $D_s$                  | střední průměr stroje                                       | [mm]                 |
| $D_h$                  | průměr hřídele                                              | [mm]                 |
| $D_{\text{chl}}$       | průměr chladicí díry v rotorovém disku                      | [mm]                 |
| $D_i$                  | vnitřní průměr stroje                                       | [mm]                 |
| $D_{ki}$               | vnitřní průměr kostry čerpadla v místě rotorů               | [mm]                 |
| $D_o$                  | vnější průměr stroje                                        | [mm]                 |
| $F_{m,\text{PM1}}$     | magnetické napětí prvního permanentního magnetu             | [A]                  |
| $F_{m,\text{PM2}}$     | magnetické napětí druhého permanentního magnetu             | [A]                  |
| $F_{m,\text{PM3}}$     | magnetické napětí třetího permanentního magnetu             | [A]                  |
| $F_{m,\text{PM4}}$     | magnetické napětí čtvrtého permanentního magnetu            | [A]                  |
| $F_{\text{sr}}$        | tvárový faktor pro výpočet tepelného odporu zářením         | [-]                  |
| $H$                    | intenzita magnetického pole                                 | [A·m <sup>-1</sup> ] |
| $H_c$                  | koercitivní síla permanentního magnetu                      | [A·m <sup>-1</sup> ] |
| $H_{c20}$              | koercitivní síla při teplotě 20 °C                          | [A·m <sup>-1</sup> ] |
| $H_{\text{PM}}$        | magnetická intenzita permanentního magnetu v pracovním bodě | [A·m <sup>-1</sup> ] |
| $H_{\delta\max}$       | maximální intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře   | [A·m <sup>-1</sup> ] |
| $I_f$                  | fázový proud                                                | [A]                  |
| $I_{f\max}$            | maximální fázový proud                                      | [A]                  |
| $I_{fn}$               | jmenovitý fázový proud                                      | [A]                  |

|                  |                                                                                                           |                                    |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| $J_h$            | moment setrvačnosti hřídele                                                                               | $[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$       |
| $J_{\max}$       | maximální proudová hustota                                                                                | $[\text{A}\cdot\text{m}^{-2}]$     |
| $J_{PM}$         | moment setrvačnosti od permanentních magnetů rotoru                                                       | $[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$       |
| $J_{rj}$         | moment setrvačnosti rotorového jha                                                                        | $[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$       |
| $J_s$            | celkový moment setrvačnosti                                                                               | $[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$       |
| $L_d$            | indukčnost v ose $d$                                                                                      | $[\text{H}]$                       |
| $L_i$            | délka cívkové strany                                                                                      | $[\text{H}]$                       |
| $L_q$            | indukčnost v ose $q$                                                                                      | $[\text{H}]$                       |
| $M_i$            | vnitřní moment                                                                                            | $[\text{N}\cdot\text{m}]$          |
| $M_{\max}$       | maximální zátěžný moment                                                                                  | $[\text{N}\cdot\text{m}]$          |
| $M_n$            | jmenovitý moment                                                                                          | $[\text{N}\cdot\text{m}]$          |
| $N_1$            | počet závitů v jedné fázi                                                                                 | $[-]$                              |
| $N_2$            | počet závitů v jedné fázi po korekci na základě výsledků z MKP                                            | $[-]$                              |
| $N_c$            | počet závitů na pól a fázi                                                                                | $[-]$                              |
| $Nu_{Rc1}$       | Nusseltovo číslo pro výpočet tepelného odporu prouděním mezi statorem a vzduchovou mezerou                | $[-]$                              |
| $Nu_{Rc3}$       | Nusseltovo číslo pro výpočet tepelného odporu prouděním mezi vnější plochou rotorového disku a prostředím | $[-]$                              |
| $Nu_{Rc3p}$      | Nusseltovo číslo pro výpočet tepelného odporu prouděním mezi vnějším obvodem rotoru a prostředím          | $[-]$                              |
| $P_1$            | příkon motoru                                                                                             | $[\text{W}]$                       |
| $P_{1c}$         | příkon soustavy motoru s magnetickými ložisky                                                             | $[\text{W}]$                       |
| $P_{1m}$         | příkon motoru bez magnetických ložisek                                                                    | $[\text{W}]$                       |
| $P_2$            | výkon motoru/příkon oběžného kola                                                                         | $[\text{W}]$                       |
| $P_{el}$         | elektrický příkon                                                                                         | $[\text{W}]$                       |
| $P_{ložiska}$    | elektrický příkon dvojice aktivních radiálních magnetických ložisek                                       | $[\text{W}]$                       |
| $P_{mech}$       | mechanický výkon na hřídeli motoru/příkon oběžného kola                                                   | $[\text{W}]$                       |
| $Pr$             | Prandtlovo číslo                                                                                          | $[-]$                              |
| $Q$              | počet cívkových stran                                                                                     | $[-]$                              |
| $Q_n$            | jmenovitý průtok čerpadla                                                                                 | $[\text{l}\cdot\text{min}^{-1}]$   |
| $\dot{Q}_{Rc3}$  | tepelný tok přes tepelný odpor $R_{c3}$                                                                   | $[\text{W}]$                       |
| $\dot{Q}_{Rc3p}$ | tepelný tok přes tepelný odpor $R_{c3p}$                                                                  | $[\text{W}]$                       |
| $Q_{vz}$         | objemový průtok vzduchu přes vzduchovou mezeru                                                            | $[\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}]$ |
| $\dot{Q}_{vz}$   | tepelný tok procházející vzduchovou mezerou                                                               | $[\text{W}]$                       |
| $Ra$             | drsnost povrchu                                                                                           | $[\mu\text{m}]$                    |

|                  |                                                                                                            |                    |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| $R_{c,agPM}$     | tepelný odpor prouděním mezi vzduchovou mezerou a permanentními magnety                                    | $[K \cdot W^{-1}]$ |
| $R_{c,wa}$       | tepelný odpor prouděním mezi čely cívek a vnějším prostředím                                               | $[K \cdot W^{-1}]$ |
| $R_{c1}$         | tepelný odpor prouděním mezi statorem a vzduchovou mezerou                                                 | $[K \cdot W^{-1}]$ |
| $R_{c2}$         | tepelný odpor prouděním mezi vzduchovou mezerou a rotorovým diskem                                         | $[K \cdot W^{-1}]$ |
| $R_{c3}$         | tepelný odpor prouděním mezi vnější plochou rotorového disku a prostředím                                  | $[K \cdot W^{-1}]$ |
| $R_{c3p}$        | tepelný odpor prouděním mezi vnějším obvodem rotoru a prostředím                                           | $[K \cdot W^{-1}]$ |
| $R_{d,PMrd}$     | tepelný odpor vedením mezi permanentními magnety a rotorový diskem                                         | $[K \cdot W^{-1}]$ |
| $Re_{cf}$        | Reynoldsovo číslo pro výpočet součinitele odporu pro turbulentní proudění                                  | $[-]$              |
| $Re_{cMrad}$     | Reynoldsovo číslo pro výpočet součinitel zpětného momentu pro radiální ztráty                              | $[-]$              |
| $Re_{Rc3}$       | Reynoldsovo číslo pro výpočet tepelného odporu prouděním mezi vnější plochou rotorového disku a prostředím | $[-]$              |
| $Re_{Rc3p}$      | Reynoldsovo číslo pro výpočet tepelného odporu prouděním mezi vnějším obvodem rotoru a prostředím          | $[-]$              |
| $R_i$            | vnitřní poloměr stroje                                                                                     | $[m]$              |
| $R_{m,v1}$       | magnetický odpor vinutí                                                                                    | $[H^{-1}]$         |
| $R_{m,v2}$       | magnetický odpor vinutí                                                                                    | $[H^{-1}]$         |
| $R_{m,\delta 1}$ | magnetický odpor první vzduchové mezery                                                                    | $[H^{-1}]$         |
| $R_{m,\delta 2}$ | magnetický odpor druhé vzduchové mezery                                                                    | $[H^{-1}]$         |
| $R_{m,\delta 3}$ | magnetický odpor třetí vzduchové mezery                                                                    | $[H^{-1}]$         |
| $R_{m,\delta 4}$ | magnetický odpor čtvrté vzduchové mezery                                                                   | $[H^{-1}]$         |
| $R_o$            | vnější poloměr stroje                                                                                      | $[m]$              |
| $R_{pch1}$       | vzdálenost středu ventilačního otvoru od osy rotace                                                        | $[m]$              |
| $R_{r,rpe}$      | tepelný odpor zářením z vnějšího obvodu rotorového disku do prostředí                                      | $[K \cdot W^{-1}]$ |
| $R_{r,sPM}$      | tepelný odpor záření ze statoru do permanentních magnetů                                                   | $[K \cdot W^{-1}]$ |
| $R_{r,srd}$      | tepelný odpor záření ze statoru do rotorového disku                                                        | $[K \cdot W^{-1}]$ |
| $R_{r1}$         | tepelný odpor zářením ze statoru do rotoru                                                                 | $[K \cdot W^{-1}]$ |
| $R_s$            | odpor jedné fáze statorového vinutí                                                                        | $[\Omega]$         |
| $S_8$            | plocha vyústění čerpadla                                                                                   | $[m^2]$            |

|               |                                                                |                                  |
|---------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| $S_c$         | čistá plocha cívký                                             | $[m^2]$                          |
| $S_{cu}$      | vypočtená plocha vodiče                                        | $[m^2]$                          |
| $S_{cu1}$     | plocha normalizovaného vodiče                                  | $[m^2]$                          |
| $S_{chl}$     | plocha chladicí díry v rotorovém disku                         | $[m^2]$                          |
| $S_N$         | plocha mezi oběžným kolem a stěnou difuzoru v nejužším místě   | $[m^2]$                          |
| $S_{PM}$      | plocha permanentního magnetu                                   | $[m^2]$                          |
| $S_r$         | plocha rotoru přijímající vyzářené teplo ze statoru            | $[m^2]$                          |
| $S_s$         | plocha statoru vyzařující teplo do rotoru                      | $[m^2]$                          |
| $U_A$         | amplitudová hodnota napětí                                     | $[V]$                            |
| $U_{ef}$      | efektivní hodnota napětí                                       | $[V]$                            |
| $U_f$         | fázová hodnota napětí                                          | $[V]$                            |
| $U_{i1}$      | indukované napětí před korekcí závitů                          | $[V]$                            |
| $U_{i2}$      | indukované napětí po korekci závitů                            | $[V]$                            |
| $U_{if}$      | fázová hodnota indukovaného napětí                             | $[V]$                            |
| $U_s$         | sdružená hodnota napětí                                        | $[V]$                            |
| $X_1$         | rozptylová reaktance                                           | $[\Omega]$                       |
| $X_{1d}$      | reaktance od diferenčního rozptylového toku                    | $[\Omega]$                       |
| $X_{1e}$      | reaktance od čel vinutí                                        | $[\Omega]$                       |
| $X_{1s}$      | reaktance od rozptylu okolo radiálních částí vodiče            | $[\Omega]$                       |
| $X_{ad}$      | vlastní reaktance statoru v ose $d$                            | $[\Omega]$                       |
| $X_{aq}$      | vlastní reaktance statoru v ose $q$                            | $[\Omega]$                       |
| $X_d$         | celková reaktance statoru v ose $d$                            | $[\Omega]$                       |
| $X_q$         | celková reaktance statoru v ose $q$                            | $[\Omega]$                       |
| $X_s$         | synchronní reaktance                                           | $[\Omega]$                       |
| $a_w$         | počet paralelních drátů vodiče                                 | $[-]$                            |
| $b_{2D}$      | šířka oběžného kola čerpadla                                   | $[m]$                            |
| $C_f$         | součinitel odporu pro turbulentní proudění                     | $[-]$                            |
| $C_{Mi}$      | součinitel zpětného momentu pro vnitřní průměr diskových ztrát | $[-]$                            |
| $C_{Mo}$      | součinitel zpětného momentu pro vnější průměr diskových ztrát  | $[-]$                            |
| $C_{Mrad}$    | součinitel zpětného momentu pro radiální ztráty                | $[-]$                            |
| $\cos\varphi$ | účinnost stroje                                                | $[-]$                            |
| $C_{p,air}$   | měrná tepelná kapacita vzduchu při konstantní tlaku            | $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ |
| $d_{cu}$      | vypočtený průměr vodiče                                        | $[m]$                            |
| $d_{cu1}$     | normalizovaný průměr vodiče                                    | $[m]$                            |
| $f$           | frekvence napájecího napětí                                    | $[Hz]$                           |
| $g$           | tíhové zrychlení                                               | $[m \cdot s^{-2}]$               |

|                |                                                                                           |                                       |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| $g_{ed}$       | ekvivalentní vzduchová mezera v ose $d$                                                   | [m]                                   |
| $g_{eqq}$      | ekvivalentní vzduchová mezera v ose $q$                                                   | [m]                                   |
| $h_c$          | tloušťka cívký/vinutí                                                                     | [m]                                   |
| $h_{fr}$       | průměrný součinitel přestupu tepla pro vnější plochu rotorového disku                     | [m <sup>2</sup> ·K]                   |
| $h_g$          | mechanická vzduchová mezera                                                               | [m]                                   |
| $h_p$          | průměrný součinitel přestupu tepla pro vnější obvod rotoru                                | [m <sup>2</sup> ·K]                   |
| $h_{PM,t}$     | tloušťka permanentního magnetu                                                            | [m]                                   |
| $h_{PM,v}$     | výška permanentního magnetu                                                               | [m]                                   |
| $h_r$          | tloušťka rotoru                                                                           | [m]                                   |
| $h_{rs}$       | průměrný součinitel přestupu tepla mezi statorem a proudícím vzduchem ve vzduchové mezeře | [m <sup>2</sup> ·K]                   |
| $i$            | okamžitá hodnota proudu                                                                   | [A]                                   |
| $i_U$          | okamžitá hodnota proudu ve fázi U                                                         | [A]                                   |
| $i_V$          | okamžitá hodnota proudu ve fázi V                                                         | [A]                                   |
| $i_W$          | okamžitá hodnota proudu ve fázi W                                                         | [A]                                   |
| $k_{air}$      | tepelná vodivost vzduchu                                                                  | [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ] |
| $k_{ax}$       | koeficient drsnosti pro výpočet diskových ztrát                                           | [m]                                   |
| $k_{cu}$       | činitel plnění mědi                                                                       | [-]                                   |
| $k_d$          | poměrový koeficient stroje                                                                | [-]                                   |
| $k_{d1}$       | činitel rozložení vinutí                                                                  | [-]                                   |
| $k_{fd}$       | poměr amplitudy první harmonické k celkové amplitudě magnetické indukce v o ose $d$       | [-]                                   |
| $k_{fq}$       | poměr amplitudy první harmonické k celkové amplitudě magnetické indukce v o ose $q$       | [-]                                   |
| $k_{p1}$       | činitel kroku vinutí                                                                      | [-]                                   |
| $k_{rad}$      | koeficient drsnosti pro výpočet radiálních ztrát                                          | [-]                                   |
| $k_{w1}$       | koeficient vinutí                                                                         | [-]                                   |
| $k_{\Delta U}$ | činitel poklesu napětí                                                                    | [-]                                   |
| $l_{1av}$      | středí délka vodiče v jednom závitě cívký                                                 | [m]                                   |
| $l_{1emax}$    | délka čela vinutí na vnějším průměru stroje                                               | [m]                                   |
| $l_{1emin}$    | délka čela vinutí na vnitřním průměru stroje                                              | [m]                                   |
| $l_b$          | délka ohybu cívký                                                                         | [m]                                   |
| $l_h$          | délka hřídele                                                                             | [m]                                   |
| $m$            | celková hmotnost stroje                                                                   | [kg]                                  |
| $m_1$          | počet fází                                                                                | [-]                                   |
| $m_{cu}$       | hmotnost vinutí                                                                           | [kg]                                  |
| $m_{cuakt}$    | hmotnost aktivních částí vinutí                                                           | [kg]                                  |

|                       |                                                                    |                                    |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| $m_{\text{cuneakt}}$  | hmotnost neaktivních částí vinutí                                  | [kg]                               |
| $m_{\text{epoxy}}$    | hmotnost zalévací epoxydové hmoty                                  | [kg]                               |
| $m_h$                 | hmotnost hřídele                                                   | [kg]                               |
| $m_{\text{PM}}$       | hmotnost permanentních magnetů rotoru                              | [kg]                               |
| $m_r$                 | hmotnost rotoru                                                    | [kg]                               |
| $m_{rj}$              | hmotnost rotorového jha                                            | [kg]                               |
| $\dot{m}_{\text{vz}}$ | hmotnostní průtok vzduchu vzduchovou mezerou                       | [kg·s <sup>-1</sup> ]              |
| $n$                   | otáčky stroje                                                      | [ot·min <sup>-1</sup> ]            |
| $n_{\text{chl}}$      | počet chladicích děr v jednom rotorovém disku                      | [-]                                |
| $n_{\text{max}}$      | maximální otáčky stroje                                            | [ot·min <sup>-1</sup> ]            |
| $n_n$                 | jmenovité otáčky stroje                                            | [ot·min <sup>-1</sup> ]            |
| $p$                   | počet pólových dvojic                                              | [-]                                |
| $q_1$                 | počet cívkových stran na pól a fázi                                | [-]                                |
| $r_2$                 | poloměr oběžného kola                                              | [m]                                |
| $r_c$                 | poloměr určující rozhraní mezi laminárním a turbulentním prouděním | [m]                                |
| $r_T$                 | vstupní poloměr krycího (sacího) disku                             | [m]                                |
| $t$                   | čas                                                                | [s]                                |
| $u$                   | okamžitá hodnota napětí                                            | [V]                                |
| $u_{iU}$              | okamžitá hodnota indukovaného napětí ve fázi U                     | [V]                                |
| $u_{iUV}$             | okamžitá sdružená hodnota indukovaného napětí mezi fází U a V      | [V]                                |
| $u_{iV}$              | okamžitá hodnota indukovaného napětí ve fázi V                     | [V]                                |
| $u_{iVW}$             | okamžitá sdružená hodnota indukovaného napětí mezi fází V a W      | [V]                                |
| $u_{iW}$              | okamžitá hodnota indukovaného napětí ve fázi W                     | [V]                                |
| $u_{iWU}$             | okamžitá sdružená hodnota indukovaného napětí mezi fází W a U      | [V]                                |
| $u_s$                 | okamžitá sdružená hodnota napětí                                   | [V]                                |
| $u_U$                 | okamžitá hodnota napětí ve fázi U                                  | [V]                                |
| $u_{UV}$              | okamžitá sdružená hodnota napětí mezi fází U a V                   | [V]                                |
| $u_V$                 | okamžitá hodnota napětí ve fázi V                                  | [V]                                |
| $u_{VW}$              | okamžitá sdružená hodnota napětí mezi fází V a W                   | [V]                                |
| $u_{WU}$              | okamžitá sdružená hodnota napětí mezi fází W a U                   | [V]                                |
| $V_{\text{air}}$      | kinematická viskozita vzduchu                                      | [m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ] |
| $V_{\text{chl}}$      | rychlost proudění vzduchu ve vzduchové mezeře                      | [m·s <sup>-1</sup> ]               |
| $\alpha_B$            | koeficient změny remanentní magnetické indukce s teplotou          | [%]                                |
| $\alpha_H$            | koeficient změny koercitivní síly s teplotou                       | [%]                                |

|                         |                                                                   |                    |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------|
| $\alpha_{PM}$           | pólové krytí                                                      | [-]                |
| $\alpha_{PM,v}$         | úhel výseče permanentního magnetu                                 | [°]                |
| $\alpha_{xy}$           | úhlové vychýlení od roviny $xy$                                   | [°]                |
| $\alpha_{xy,max}$       | maximální úhlové vychýlení od roviny $xy$                         | [°]                |
| $\alpha_{\sigma cu}$    | součinitel změny elektrické vodivosti mědi s teplotou             | [K <sup>-1</sup> ] |
| $\beta$                 | zátěžný úhel                                                      | [°]                |
| $\beta_{air}$           | koeficient objemové roztažnosti vzduchu                           | [K <sup>-1</sup> ] |
| $\beta_c$               | koeficient poměru cívkového kroku k pólové rozteči                | [-]                |
| $\Delta M_i$            | změna vnitřního momentu                                           | [N·m]              |
| $\Delta P$              | celkový ztrátový výkon                                            | [W]                |
| $\Delta P_{ax}$         | diskové ztráty způsobené třením rotorů o kapalinu                 | [W]                |
| $\Delta P_c$            | celkové ztráty soustavy motoru s magnetickými ložisky             | [W]                |
| $\Delta P_e$            | vířivé ztráty vodiče                                              | [W]                |
| $\Delta P_{j1}$         | ztráty ve vinutí                                                  | [W]                |
| $\Delta P_m$            | celkové ztráty motoru bez magnetických ložisek                    | [W]                |
| $\Delta P_{mech}$       | celkové mechanické ztráty                                         | [W]                |
| $\Delta P_{mech,L}$     | mechanické ztráty magnetických ložisek (pohyb v kapalině)         | [W]                |
| $\Delta P_{mech,M}$     | mechanické ztráty motoru (pohyb v kapalině)                       | [W]                |
| $\Delta P_{PM}$         | ztráty v permanentních magnetech                                  | [W]                |
| $\Delta P_{rad}$        | celkové radiální ztráty způsobené třením rotorů o kapalinu        | [W]                |
| $\Delta P_{rad,jho+PM}$ | radiální ztráty rotoru – diskového rotoru s permanentními magnety | [W]                |
| $\Delta P_{rad,PM}$     | radiální ztráty rotoru – oběžné kolo s permanentními magnety      | [W]                |
| $\Delta P_{rot}$        | rotační ztráty stroje při provozu na vzduchu                      | [W]                |
| $\Delta P_{rot,i}$      | diskové ztráty pro vnitřní průměr stroje                          | [W]                |
| $\Delta P_{rot,o}$      | diskové ztráty pro vnější průměr stroje                           | [W]                |
| $\Delta U_i$            | změna indukovaného napětí                                         | [V]                |
| $\Delta x$              | výchylka v ose $x$                                                | [mm]               |
| $\Delta x_{max}$        | maximální výchylka v ose $x$                                      | [mm]               |
| $\Delta y_{max}$        | maximální výchylka v ose $y$                                      | [mm]               |
| $\Delta z$              | výchylka v ose $z$                                                | [mm]               |
| $\Delta z_{max}$        | maximální výchylka v ose $z$                                      | [mm]               |
| $\Delta v$              | oteplení vzhledem k teplotě okolí                                 | [°C]               |
| $\Delta v_r$            | oteplení rotoru vzhledem k teplotě okolí                          | [°C]               |
| $\Delta v_s$            | oteplení statoru vzhledem k teplotě okolí                         | [°C]               |
| $\Delta v_{vz}$         | oteplení vzduchu ve vzduchové mezeře vzhledem k teplotě okolí     | [°C]               |

|                  |                                                        |                       |
|------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------|
| $\varepsilon_r$  | emisivita rotorového disku                             | [-]                   |
| $\varepsilon_s$  | emisivita statoru                                      | [-]                   |
| $\eta$           | účinnost                                               | [%]                   |
| $\eta_c$         | účinnost soustavy motoru s magnetickými ložisky        | [%]                   |
| $\eta_{dair}$    | dynamická viskozita vzduchu                            | [Pa·s]                |
| $\eta_{dw}$      | dynamická viskozita vody                               | [Pa·s]                |
| $\eta_m$         | účinnost motoru                                        | [%]                   |
| $\lambda_{1d}$   | koefficient magnetické vodivosti pro výpočet $x_{1d}$  | [-]                   |
| $\lambda_{1e}$   | koefficient magnetické vodivosti pro výpočet $x_{1e}$  | [-]                   |
| $\lambda_{1s}$   | koefficient magnetické vodivosti pro výpočet $x_{1s}$  | [-]                   |
| $\mu_0$          | permeabilita vakua                                     | [H·m <sup>-1</sup> ]  |
| $\mu_{rPM}$      | relativní permeabilita permanentního magnetu           | [-]                   |
| $\rho_{air}$     | měrná hustota vzduchu                                  | [kg·m <sup>-3</sup> ] |
| $\rho_{cu}$      | měrná hustota mědi                                     | [kg·m <sup>-3</sup> ] |
| $\rho_{Fe}$      | měrná hustota železa                                   | [kg·m <sup>-3</sup> ] |
| $\rho_{PM}$      | měrná hustota permanentního magnetu                    | [kg·m <sup>-3</sup> ] |
| $\rho_w$         | měrná hustota vody                                     | [kg·m <sup>-3</sup> ] |
| $\sigma_{cu}$    | elektrická vodivost mědi při dané teplotě              | [S·m <sup>-1</sup> ]  |
| $\sigma_{cu,20}$ | elektrická vodivost mědi při 20 °C                     | [S·m <sup>-1</sup> ]  |
| $\tau_c$         | cívkový krok                                           | [-]                   |
| $\tau_{ci}$      | šířka cívky na vnitřním průměru stroje                 | [m]                   |
| $\tau_{d1}$      | činitel statorového diferenčního rozptylu              | [-]                   |
| $\tau_p$         | pólová rozteč vinutí                                   | [-]                   |
| $\tau_{ps}$      | střední pólová rozteč vinutí                           | [-]                   |
| $U_0$            | teplota okolního prostředí                             | [°C]                  |
| $U_{in}$         | teplota chladicího média na vstupu do stroje           | [°C]                  |
| $U_{out}$        | teplota chladicího média na výstupu ze stroje          | [°C]                  |
| $U_{PM}$         | ustálená teplota permanentního magnetu za chodu stroje | [°C]                  |
| $U_r$            | teplota rotoru                                         | [°C]                  |
| $U_s$            | teplota statoru                                        | [°C]                  |
| $U_{vz}$         | teplota chladicího média ve vzduchové mezeře           | [°C]                  |
| $U_w$            | teplota vinutí                                         | [°C]                  |
| $\varphi$        | fázový posuv proudu vůči napětí                        | [°]                   |
| $\Phi$           | magnetický tok                                         | [Wb]                  |
| $\Phi_f$         | maximální hodnota magnetického toku ve vinutí          | [Wb]                  |
| $\Psi$           | spřažený magnetický tok                                | [Wb]                  |
| $\Psi_U$         | spřažený magnetický tok ve fázi U                      | [Wb]                  |
| $\Psi_V$         | spřažený magnetický tok ve fázi V                      | [Wb]                  |

|            |                                   |                        |
|------------|-----------------------------------|------------------------|
| $\psi_W$   | spřažený magnetický tok ve fázi W | [Wb]                   |
| $\omega$   | úhlová rychlost                   | [rad·s <sup>-1</sup> ] |
| $\omega_n$ | jmenovitá úhlová rychlost         | [rad·s <sup>-1</sup> ] |

#### Zkratka Význam

|         |                                                                                                     |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3D      | trojrozměrný či trojdimenzionální                                                                   |
| AFPM    | stroj s axiálním magnetickým tokem ( <b>a</b> xial <b>f</b> lux <b>p</b> ermanent <b>m</b> agnet)   |
| BH      | křivka magnetické indukce v závislosti na magnetické intenzitě                                      |
| BUT     | Vysoké učení technické v Brně ( <b>B</b> rno <b>U</b> niversity of <b>T</b> echnology)              |
| CAD     | počítačová podpora konstruování ( <b>c</b> omputer <b>a</b> ided <b>d</b> esign)                    |
| d, q    | označení os souřadného systému rotujícího rychlosti magnetického pole                               |
| F, H    | označení typu izolací                                                                               |
| FFT     | rychlá Fourierova transformace ( <b>F</b> ast <b>F</b> ourier <b>t</b> ransform)                    |
| FSI     | <b>F</b> akulta <b>s</b> trojního <b>i</b> nženýrství Vysokého učení technického v Brně             |
| LPG     | zkapalněný ropný plyn ( <b>l</b> iquefied <b>p</b> etroleum <b>g</b> as)                            |
| M       | teplotní třída permanentních magnetů                                                                |
| MKP     | <b>m</b> etoda <b>k</b> onečných <b>p</b> rvků                                                      |
| N52M    | označení typu permanentních magnetů                                                                 |
| PM      | <b>p</b> ermanentní <b>m</b> agnet                                                                  |
| RFPM    | stroj s radiálním magnetickým tokem ( <b>r</b> adial <b>f</b> lux <b>p</b> ermanent <b>m</b> agnet) |
| SJ      | uspořádání protilehlých permanentních magnetů: <b>s</b> ever- <b>j</b> ih                           |
| SS      | uspořádání protilehlých permanentních magnetů: <b>s</b> ever- <b>s</b> ever                         |
| U, V, W | označení fází                                                                                       |
| VUT     | <b>V</b> ysoké <b>u</b> čení <b>t</b> echnické v Brně                                               |
| x, y, z | označení os obecného souřadného systému (osa z je rotační)                                          |
| xy      | označení roviny xy (středová rovina případně rovina symetričnosti)                                  |

# Seznam příloh

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Příloha 1: Analytický výpočet axiálního motoru pro bezucpávkové čerpadlo.....  | 76 |
| Příloha 2: Tepelný výpočet motoru s axiálním tokem a bezželezným statorem..... | 87 |
| Příloha 3: Náčrtek permanentního magnetu.....                                  | 91 |
| Příloha 4: Katalogový list permanentního magnetu N52M (převzato z [23]).....   | 92 |
| Příloha 5: Zdrojový kód pro software Matlab – výpočet tepelné sítě .....       | 93 |

### **Příloha 1: Analytický výpočet axiálního motoru pro bezucpávkové čerpadlo**

Analytický výpočet byl převzat z literatury [2], současně bylo využito informací z [1]. Metodika výpočtu diskových a radikálních ztrát byla převzata z [41] a [42].

#### **Určení rozměrů a parametrů vinutí statoru**

Celkový počet závitů jedné fáze  $N_1$  lze určit z indukovaného napětí dle rovnice (1).

$$N_1 = \frac{U_{if}}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot f \cdot k_{w1} \cdot \phi_f} \quad (1)$$

Magnetický tok  $\phi_f$  je možné dopočítat rovnicí (5). Hodnotu koeficientu vinutí  $k_{w1}$  udává rovnice (6). Indukované napětí ve fázi  $U_{if}$  se vyčíslí přes koeficient poklesu napětí  $k_{\Delta U}$ . Ten je definován jako poměr indukovaného napětí k celkovému napětí na svorkách stroje. Koeficient poklesu napětí pro motor je vždy menší jak 1. Indukované napětí u generátoru je vyšší než napětí svorkové (koeficient poklesu napětí nabývá hodnoty vyšší než 1).

$$k_{\Delta U} = \frac{U_{if}}{U_f} \Rightarrow U_f = \frac{U_{if}}{k_{\Delta U}} \quad (2)$$

Rovnice (3) vyjadřuje tok procházející skrze plochu jednoho pólu.

$$\phi_f = \int_{R_i}^{R_o} B_{\delta str} \cdot \frac{2\pi}{2p} \cdot r \, dr = B_{\delta str} \cdot \frac{2\pi}{2p} \cdot (R_o^2 - R_i^2) \quad (3)$$

Kde rozměr  $R_o$  je vnější a  $R_i$  vnitřní poloměr rotoru. V rámci zjednodušení výsledných vztahů lze definovat koeficient poměru  $k_d$  (rovnice (4)), neboť poměr vnitřního ku vnějšímu poloměru je shodný s poměrem vnitřního průměru  $D_i$  ku vnějšímu průměru  $D_o$ .

$$k_d = \frac{R_i}{R_o} = \frac{D_i}{D_o} \quad (4)$$

Po dosazení poměrového koeficientu do rovnice (3) vznikne tvar (5).

$$\phi_f = B_{\delta str} \cdot \frac{\pi}{2p} \cdot \left[ \left( \frac{1}{2} \cdot D_o \right)^2 - \left( \frac{1}{2} \cdot D_i \right)^2 \right] = B_{\delta str} \cdot \frac{\pi}{8p} \cdot D_o^2 \cdot (1 - k_d^2) \quad (5)$$

Dále pro určení počtu závitů z indukovaného napětí je nezbytné vypočítat koeficient vinutí  $k_{w1}$ . Pokud je předem znám počet drážek lze určit z (6) jako součin činitele rozložení vinutí  $k_{d1}$  a činitele kroku vinutí  $k_{p1}$ . Hodnotu koeficientu vinutí je možné odhadnout.

$$k_{w1} = k_{d1} \cdot k_{p1} \quad (6)$$

Kde činitel kroku  $k_{p1}$  je dán vztahem (7).

$$k_{d1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m_1}\right)}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m_1 \cdot q_1}\right)} \quad (7)$$

Počet cívkových stran na pól a fázi  $q_1$  v rovnici (7) se určí vztahem (8).

$$q_1 = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m_1} \quad (8)$$

Kde symbol  $Q$  značí počet cívkových stran. Další neznámou ve vztahu (6) je činitel kroku vinutí. Ten se určí s pomocí vztahu (9).

$$k_{p1} = \sin\left(\beta_c \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad (9)$$

Kde poměr cívkových stran  $\beta_c$  se získá z rovnice (10) jako poměr cívkového kroku  $\tau_c$  a pólové rozteče  $\tau_p$ .

$$\beta_c = \frac{\tau_c}{\tau_p} \quad (10)$$

Pomocí počtu cívkových stran  $Q$  lze pólovou rozteč vyjádřit vztahem (11).

$$\tau_p = \frac{Q}{2 \cdot p} \quad (11)$$

Při znalosti celkového počtu závitů na fázi je možné prostřednictvím rovnice (12) vyčíslit počet závitů připadajících na jeden na pól a fázi  $N_c$ .

$$N_c = \frac{N_1}{2 \cdot p \cdot q_1} \quad (12)$$

V rámci dimenzování vodiče nelze navrhovat průřez na základě proudu jmenovitého. Je nutné uvažovat i možný provoz motoru ve stavu trvalého přetížení. Hodnota možného maximálního momentového přetížení  $M_{max}$  je uvedena v Tab. 3. Pro určení maximálního proudu  $I_{fmax}$  je nutné zavést následující dvojici zjednodušení:

- a) navrhovaný synchronní stroj je buzen prostřednictvím permanentních magnetů. Při zanedbání snížení magnetického toku přes vinutí vlivem reakce kotvy lze uvažovat neměnnou hodnotu momentové konstanty stroje,
- b) velikost účinníku je shodná při jmenovitém i maximální zátěžném momentu. Poté je možné uvažovat o přímé úměře proudu a momentu (viz rovnice (13)). Následnou úpravou výsledného poměru se určí hledaný maximální proud  $I_{fmax}$ .

$$\frac{M_n}{I_{fn}} = \frac{M_{max}}{I_{fmax}} \Rightarrow I_{fmax} = \frac{M_{max} \cdot I_{fn}}{M_n} \quad (13)$$

Z maximálního proudu a zvolené proudové hustoty ve vodiči  $J_{max}$  se vztahem (14) získá potřebný průřez vodiče  $S_{cu}$ .

$$J_{max} = \frac{I_{fmax}}{S_{cu}} \Rightarrow S_{cu} = \frac{I_{fmax}}{J_{max}} \quad (14)$$

Vyjádřením průměru z modifikovaného geometrického vzorce pro obsah kruhu se získá hledaný průměr vodiče  $d_{cu}$  (rovnice (15)).

$$d_{cu} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{cu}}{\pi \cdot a_w}} \quad (15)$$

Kde symbol  $a_w$  značí počet paralelních vodičů cívky, na kterém závisí výsledný průměr jednoho vodiče. Výsledný počet paralelních vodičů byl stanoven opakovaným výpočtem rovnice (16).

Vypočtená hodnota průměru vodiče slouží pro nalezení vhodného vodiče z normalizované řady dle ČSN IEC 317. Zpravidla se z normalizované řady vodičů volí průměr nejbližší vyšší. Na základě znalosti výsledného průměru  $d_{cu1}$  je možné reciprocitně k rovnici (15) opět získat novou plochu vodiče z rovnice (16).

$$S_{cu1} = \frac{\pi \cdot d_{cu1}^2}{4} \quad (16)$$

Výsledný průřez cívky  $S_c$  lze vypočítat dle vzorce (17) (za předpokladu stejné plochy po celé výšce cívkové strany).

$$S_c = a_w \cdot S_{cu1} \cdot N_c \cdot k_{cu} \quad (17)$$

Kde symbol  $k_{cu}$  značí koeficient plnění cívkové strany.

Dále po úpravě rovnice (4) v rovnici (18) pomocí poměrového koeficientu  $k_d$  lze vypočítat hledaný vnitřní průměr rotoru  $D_i$ .

$$D_i = k_d \cdot D_o \quad (18)$$

Dalším podstatným rozměrem je hloubka cívek  $h_c$ . Pro její určení je nutné provést výpočet šířky cívky ve spodním průměru  $\tau_{ci}$  rovnicí (19). Cívka je nejvíce prostorově omezena právě ve spodním průměru.

$$\tau_{ci} = \frac{\pi \cdot D_i}{Q} \quad (19)$$

Předpokládá-li se obdélníkový průřez cívek a je-li v kritickém místě známa celková plocha a šířka cívky lze vztahem (20) dopočítat hloubku cívky  $h_c$ .

$$h_c = \frac{S_c}{\tau_{ci}} \quad (20)$$

Z pohledu pozdějších výpočtů je vhodné určit střední průměr  $D_s$  z rovnice (21) a současně střední pólovou rozteč  $\tau_{ps}$  vztahem (22).

$$D_s = \frac{D_o - D_i}{2} \quad (21)$$

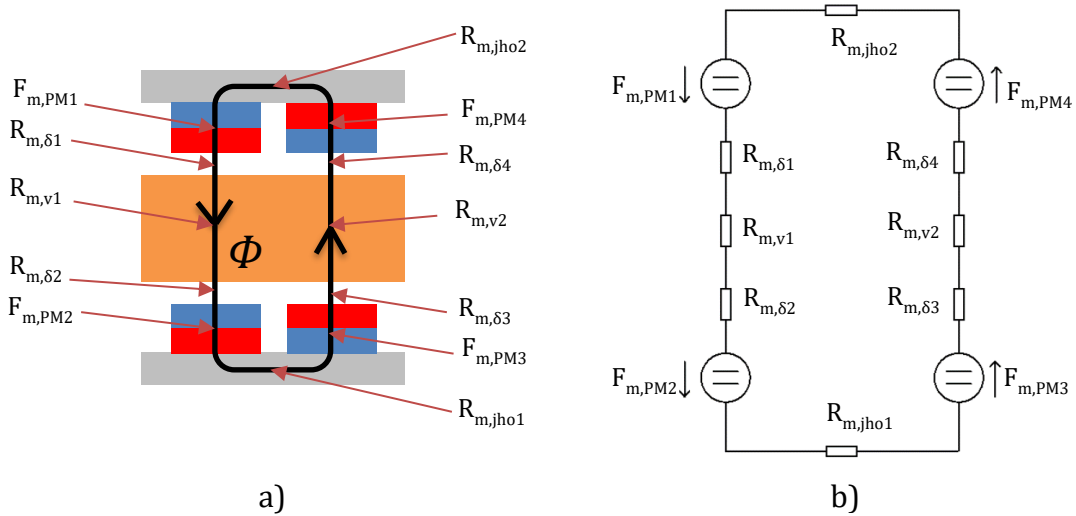
$$\tau_{ps} = \frac{\pi \cdot D_s}{2 \cdot p} \quad (22)$$

### **Návrh a výpočet rotorových permanentních magnetů**

Magnetický tok v axiálním motoru s bezželezným statorem je znázorněn na Obr. 65. Tok prochází skrze oba rotorové disky a čtyři mechanické vzduchové mezery. Při praktických výpočtech lze magnetický odpor obou rotorových disků zanedbat a zapsat rovnicí (23). Relativní permeabilita rotorového disku je několikanásobně vyšší než permeabilita vzduchové mezery a vinutí.

$$4 \cdot H_{PM} \cdot h_{PM,t} = H_{\delta max} \cdot (4 \cdot h_g + 2 \cdot h_c) \quad (23)$$

Kde  $h_g$  značí délku vzduchové mezery a  $h_{PM,t}$  tloušťku permanentního magnetu,  $H_{\delta max}$  amplitudu intenzity magnetického pole a  $H_{PM}$  intenzitu permanentního magnetu v pracovním bodě.



**Obr. 65: Magnetický obvod axiálního stroje s bezželezným statorem**  
Amplitudu intenzity magnetického pole je možné vypočítat vztahem (24).

$$H_{\delta max} = \frac{B_{\delta max}}{\mu_0} \quad (24)$$

Kde  $B_{\delta max}$  je amplituda magnetické indukce ve vzduchové mezeře a  $\mu_0$  je permeabilita vakua ( $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

Velikost  $H_{PM}$  je možné určit dvěma způsoby. První způsobem je odečtení intenzity magnetu v pracovním bodě z demagnetizační charakteristiky na základě pracovní indukce  $B_{PM}$  (viz Příloha 4). Další možností je určit hodnotu pomocí výpočetního vztahu (25), který předpokládá lineární charakter demagnetizační křivky. V navrhovaném stroji budou použity permanentní magnety ze vzácných zemin jejichž demagnetizační křivka má lineární charakter. Vztah (25) nerespektuje skutečné umístění křivky ve druhém kvadrantu (zdrojový režim). Na místo toho je celá charakteristika zrcadlově přenesena do kvadrantu prvního.

$$H_{PM} = H_c - \frac{B_{PM}}{\mu_0 \cdot \mu_{rPM}} \quad (25)$$

Kde  $\mu_{rPM}$  je relativní permeabilita permanentního magnetu.

V rámci výpočtů strojů s PM se běžně zavádí zjednodušení, které uvažuje shodnou velikost magnetické indukce v celé délce vzduchové mezery ( $B_{PM} = B_{\delta max}$ ).

Hledanou tloušťku permanentních  $h_{PM,t}$  magnetů lze vyjádřit z rovnice (23). Následnými úpravami a dosazením vztahů (24) a (25) do rovnice (23) se získá rovnice pro výšku magnetu ve tvaru (26).

$$h_{PM,t} = \frac{B_{\delta max} \cdot (4 \cdot g_{vz} + 2 \cdot h_c)}{4 \cdot \left( H_c - \frac{B_{\delta max}}{\mu_0 \cdot \mu_{rPM}} \right) \cdot \mu_0} \quad (26)$$

Díky uvažování lineární BH charakteristiky lze relativní permeabilitu dopočítat vztahem (27).

$$\mu_{rPM} = \frac{B_r}{H_c \cdot \mu_0} \quad (27)$$

Pro vyjádření  $B_{\delta max}$  lze, za předpokladu zanedbání rozptylového toku permanentního magnetu, zapsat rovnici (28).

$$B_{\delta max} = \frac{B_{\delta str}}{\alpha_{PM}} \quad (28)$$

Dále výška permanentního magnetu  $h_{PM,v}$  se určí dle (29).

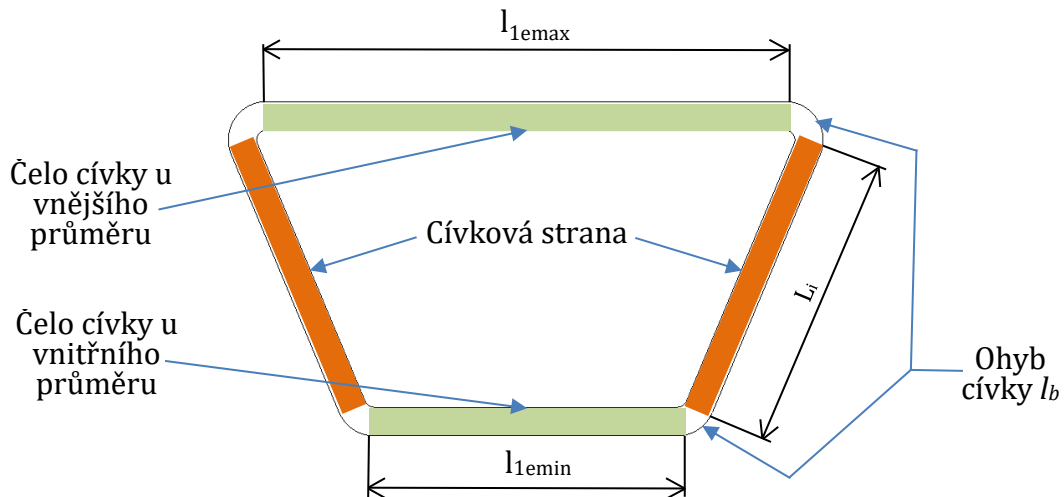
$$h_{PM,v} = \frac{D_o - D_i}{2} \quad (29)$$

Velikost úhlů výseče jednoho magnetu  $\alpha_{PM,v}$  je dána rovnicí (30).

$$\alpha_{PM,v} = \frac{360}{2p} \cdot \alpha_{PM} \quad (30)$$

### **Výpočet náhradních parametrů motoru**

Prvním řešeným parametrem je ohmický odpor statorového vinutí. Pro jeho výpočet je nutné znát střední délku závitů cívky  $l_{1av}$ . Cívku lze v rámci výpočtu rozdělit na několik částí. Základní tvar cívky použitý ve vinutí navrhovaného stroje se nachází na Obr. 66.



**Obr. 66: Naznačení elementů lichoběžníkové cívky**

Tvar cívky byl rozdělen na pět elementárních částí. Výsledná délka středního závitů je dána součtem jednotlivých elementů dle rovnice (31).

$$l_{1av} = 2 \cdot L_i + l_{1emin} + l_{1emax} + 4 \cdot l_b \quad (31)$$

Délku cívkové strany  $L_i$  se určí z (32). Dále na základě rovnice (33) se získá délka čela u vnitřního průměru  $l_{1emin}$  a rovnicí (34) délka čela u vnějšího průměru  $l_{1emax}$ . Pro ohyb cívky  $l_b$  byla uvažována velikost 5 mm.

$$L_i = \frac{D_o - D_i}{2} \quad (32)$$

$$l_{1emin} = \beta \cdot \frac{\pi \cdot D_i}{2 \cdot p} \quad (33)$$

$$l_{1emax} = \beta \cdot \frac{\pi \cdot D_o}{2 \cdot p} \quad (34)$$

Výsledný odpor jedné fáze statorového vinutí je pak dán rovnicí (35).

$$R_s = \frac{N_1 \cdot l_{1av}}{\sigma_{cu} \cdot a_w \cdot \frac{\pi \cdot d_{cu1}^2}{4}} \quad (35)$$

Kde  $\sigma$  značí elektrickou vodivost při dané teplotě dle vztahu (36).

$$\sigma_{cu} = \frac{\sigma_{cu,20}}{1 + \alpha_{\sigma_{cu}} \cdot (\vartheta_w - 20)} \quad (36)$$

Kde  $\vartheta_w$  je teplota vinutí stroje. Elektrická vodivost měděného vodiče při 20 °C  $\sigma_{cu,20}$  se pohybuje mezi  $57 \cdot 10^{-6}$  až  $56 \cdot 10^{-6} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$  (dle [2]), přičemž součinitel změny vodivosti s teplotou mědi  $\alpha_{\sigma_{cu}}$  má v případě měděného vodiče hodnotu  $0,00393 \text{ K}^{-1}$  (dle [2]).

Další náhradní parametr je indukčnost  $L_d$  v ose  $d$  a indukčnost  $L_q$  v ose  $q$ . Pro jejich určení je nutné znát velikosti vlastních a rozptylových reaktancí v dq osách.

Celkovou rozptylovou reaktanci  $X_1$  lze vyjádřit jako superpozici tří dílčích reaktancí (viz (37)): rozptylová reaktance  $X_{1s}$  vznikající okolo radiální části vodiče, rozptylová reaktance čel vinutí  $X_{1e}$  a rozptylová reaktance diferenčního rozptylového toku  $X_{1d}$ .

$$X_1 = X_{1s} + X_{1e} + X_{1f} \quad (37)$$

Jednotlivé rozptylové reaktance je možné nahradit koeficienty rozptylové magnetické vodivosti. Literatura [2] udává možný výpočet rozptylové magnetické vodivosti čel vinutí  $\lambda_{1e}$  pomocí rovnice (38).

$$\lambda_{1e} = 0,3 \cdot q_1 \quad (38)$$

Dle literatury [2] platí shodné vyjádření i pro rozptylovou vodivost okolo radiální části vodiče  $\lambda_{1s}$ , poté lze zapsat rovnost (39).

$$\lambda_{1s} = 0,3 \cdot q_1 = \lambda_{1e} \quad (39)$$

Velikost koeficientu rozptylové magnetické vodivosti diferenčního rozptylového toku  $\lambda_{1d}$  je možné určit na základě vztahu (40).

$$\lambda_{1d} = \frac{m_1 \cdot q_1 \cdot \tau_{ps} \cdot k_{w1}^2}{\pi^2 \cdot (2 \cdot g + h_c) \cdot k_{sat}} \cdot \tau_{d1} \quad (40)$$

Koeficient saturace magnetického obvodu  $k_{sat}$  ve vzorci (40) je možné pro bezželezný stator uvažovat dle [2] roven jedné. Činitel statorového diferenčního rozptylu  $\tau_{d1}$  se vypočte rovnicí (41).

$$\tau_{d1} = \frac{\pi^2 \cdot (10 \cdot q_1^2 + 2)}{27} \cdot \left[ \sin\left(\frac{30^\circ}{q_1}\right) \right]^2 - 1 \quad (41)$$

Pak celkovou rozptylovou reaktanci lze za pomoci koeficientů rozptylové magnetické vodivosti vyjádřit rovnicí (42).

$$X_1 = 4 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \frac{L_i \cdot N_1^2}{p \cdot q_1} \cdot \left( \lambda_{1s} + \frac{\lambda_{1emin}}{L_i} \cdot \frac{\lambda_{1e}}{2} + \frac{\lambda_{1emax}}{L_i} \cdot \frac{\lambda_{1e}}{2} + \lambda_{1d} \right) \quad (42)$$

Dále následuje výpočet velikosti ekvivalentních vzduchových mezer. Ty jsou nezbytné pro určení vlastních indukčností  $X_{ad}$  a  $X_{aq}$ . Velikost ekvivalentní vzduchové mezery v ose  $d$   $g_{ed}$  se vypočte na základě rovnice (43).

$$g_{ed} = 2 \cdot \left[ (g_{vz} + 0,5 \cdot h_c) \cdot k_{sat} + \frac{h_{PM,t}}{\mu_{rPM}} \right] \quad (43)$$

Velikost ekvivalentní vzduchové mezery v ose  $q$   $g_{eqq}$  se určí pomocí rovnice (44).

$$g_{eqq} = 2 \cdot [(g_{vz} + 0,5 \cdot h_c) + h_{PM,t}] \quad (44)$$

Vlastní reaktance  $X_{ad}$  a  $X_{aq}$  jsou pak dány vztahy (45) a (46).

$$X_{ad} = 2 \cdot m_1 \cdot \mu_0 \cdot f \cdot \left( \frac{N_1 \cdot k_{w1}}{p} \right)^2 \cdot \frac{\left( \frac{D_o}{2} \right)^2 - \left( \frac{D_i}{2} \right)^2}{g_{eq}} \cdot k_{fd} \quad (45)$$

$$X_{aq} = 2 \cdot m_1 \cdot \mu_0 \cdot f \cdot \left( \frac{N_1 \cdot k_{w1}}{p} \right)^2 \cdot \frac{\left( \frac{D_o}{2} \right)^2 - \left( \frac{D_i}{2} \right)^2}{g_{eqq}} \cdot k_{fd} \quad (46)$$

Kde koeficient  $k_{fd}$  značí poměr amplitudy první harmonické složky indukce k celkové amplitudě indukce v  $d$  ose. Analogicky koeficient  $k_{fq}$  značí poměr amplitudy první harmonické složky indukce k celkové amplitudě indukce v ose  $q$ .

V případě permanentních magnetů zafixovaných na povrchu rotoru je dle literatury [22] možné pro koeficienty  $k_{fd}$  a  $k_{fq}$  zvolit hodnotu jedna.

Superpozicí vlastní reaktance v dané ose a celkové rozptylové reaktance se získá celková reaktance v osách  $d$  (47) a  $q$  (48). Výsledné hodnoty obou reaktancí jsou přibližně shodné.

$$X_d = X_1 + X_{ad} \quad (47)$$

$$X_q = X_1 + X_{aq} \quad (48)$$

Ze známosti hodnot reaktancí v osách  $d$  a  $q$  lze prostřednictvím obecného vztahu pro indukčnost určit velikosti indukčností  $L_d$  (49) a  $L_q$  (50).

$$L_d = \frac{X_d}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (49)$$

$$L_q = \frac{X_q}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (50)$$

### **Výpočet hmotností a momentů setrvačnosti motoru**

Výpočet celkové hmotnosti je rozdělen do tří dílčích částí: stator, rotor a hřídel.

V případě výpočtu hmotnosti statoru je uvažována hmotnost vinutí bez epoxidové zalévací hmoty. Vzhledem k navazujícím výpočtům je hmotnost vinutí  $m_{cu}$  rozdělena (viz (51)) na součet hmotnosti aktivních částí  $m_{cuakt}$  (cívkové strany – viz Obr. 66) (52) a hmotnosti neaktivních částí  $m_{cuneakt}$  (čela cívek a ohyby) (53).

$$m_{cu} = m_{cuakt} + m_{cuneakt} \quad (51)$$

$$m_{cuakt} = \rho_{cu} \cdot m_1 \cdot a_w \cdot N_1 \cdot \left( \frac{\pi \cdot d_{cu}^2}{4} \right) \cdot 2 \cdot L_i \quad (52)$$

$$m_{cuneakt} = \rho_{cu} \cdot m_1 \cdot a_w \cdot N_1 \cdot \left( \frac{\pi \cdot d_{cu}^2}{4} \right) \cdot (l_{1emin} + l_{1emax} + 4 \cdot l_{1emin}) \quad (53)$$

Kde  $\rho_{cu}$  značí měrnou hustotu vodiče (dle [1], pro měď lze uvažovat měrnou hustotu  $8800 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Hmotnost rotoru  $m_r$  lze vyjádřit rovnicí (54) jako součet hmotnosti samotného rotorového jha  $m_{rj}$  a hmotnosti permanentních magnetů  $m_{PM}$ . Na obou rotorech bude použit shodný počet i tvar permanentních magnetů.

$$m_r = m_{PM} + m_{rj} \quad (54)$$

Pro určení hmotnosti permanentních magnetů je nutné určit jejich celkový objem. Ten je dán plochou  $S_{PM}$  (55) a výškou  $h_{PM}$ .

$$S_{PM} = \alpha_{PM} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_0^2 - D_i^2) \quad (55)$$

Součinem objemu a měrné hustoty pramenních magnetů  $\rho_{PM}$  se vypočte výsledná hmotnost magnetů na rotoru dle rovnice (56). Měrná hustota permanentního magnetu typu N52M je  $7500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  dle [23])

$$m_{PM} = S_{PM} \cdot h_{PM} \cdot \rho_{PM} \quad (56)$$

Rotorové jho na přilehlé straně k oběžnému kolu bude tvořeno krycím diskem. Druhé rotorové jho bude tvořeno diskem uchyceným na společné hřídeli s magnetickými ložisky. V rámci výpočtu hmotnosti byly uvažovány obě rotorová jha shodná (oběžné kolo nebylo uvažováno). Výpočet hmotnosti rotorového jha je dán rovnicí (57). Ten nabývá podoby součinu vztahu pro výpočet objemu dutého válce a měrné hustoty materiálu rotorového jha  $\rho_{FE}$ . (dle [1] lze pro železo uvažovat měrnou hustotu  $7850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

$$m_{rj} = \pi \cdot \frac{D_o^2 - D_h^2}{4} \cdot h_r \cdot \rho_{Fe} \quad (57)$$

Dále hmotnost hřídele  $m_h$  (58) je dána součinem geometrického vztahu pro objem plného válce a měrné hustoty materiálu hřídele  $\rho_{FE}$ . (je uvažován shodný materiál pro výrobu rotorových disků a hřídele)

$$m_h = \rho_{Fe} \cdot \pi \cdot \frac{D_h^2}{4} \cdot l_h \quad (58)$$

Kde  $l_h$  značí délku hřídele a  $D_h$  průměr hřídele. Výsledná celková hmotnost navrhovaného stroje  $m$  se určí jako suma všech dílčích částí (59). Hmotnost epoxydové zalévací hmoty  $m_{epoxy}$  byla odhadnuta na 0,5 kg.

$$m = m_{cu} + m_{epoxy} + 2 \cdot m_r + m_h \quad (59)$$

Celkový moment setrvačnosti motoru  $J_s$  (rovnice (60)) je dán superpozicí momentů setrvačnosti: permanentních magnetů  $J_{PM}$  (61), rotorových disků  $J_{rj}$  (62) a hřídele  $J_h$  (63).

$$J_s = 2 \cdot J_{PM} + 2 \cdot J_{rj} + J_h \quad (60)$$

$$J_{PM} = m_{PM} \cdot \frac{D_o^2 + D_i^2}{8} \quad (61)$$

$$J_{rj} = m_{rj} \cdot \frac{D_o^2 + D_h^2}{8} \quad (62)$$

$$J_h = m_h \cdot \frac{D_h^2}{8} \quad (63)$$

### **Výpočet ztrát a účinnosti motoru**

Dle rovnice (64) je příkon motoru  $P_{1m}$  dán součtem požadovaného výkonu na hřídeli  $P_2$  a výkonu na krytí celkových ztrát motoru  $\Delta P_m$ .

$$P_{1m} = P_2 + \Delta P_m = P_2 + \Delta P_{j1} + \Delta P_e + \Delta P_{PM} + \Delta P_{mech,M} \quad (64)$$

Kde  $\Delta P_{j1}$  jsou Joulovy ztráty ve vinutí statoru,  $\Delta P_e$  ztráty vířivé ve vinutí,  $\Delta P_{PM}$  ztráty v permanentních magnetech,  $\Delta P_{mech,M}$  ztráty mechanické motoru. Joulovy ztráty pro třífázové vinutí lze určit dle (65).

$$\Delta P_{j1} = 3 \cdot R_s \cdot I_f^2 \quad (65)$$

Kde v rovnici (65) symbol  $R_s$  značí velikost odporu jedné fáze statorového vinutí a  $I_f$  je efektivní hodnota proudu procházející jednou fází statoru. Výpočet ztrát vířivými proudy připadající na jeden vodič je dán vztahem (66).

$$\Delta P_e = \frac{d_{cu}^4 \cdot L_i \cdot \pi^3 \cdot \sigma_{cu} \cdot f^2 \cdot B_{max}^2}{32} \quad (66)$$

Kde  $d_{cu}$  je průměr vodiče statorového vinutí,  $L_i$  je délka vodiče, ve které dochází ke vzniku vířivých ztrát,  $f$  značí frekvenci proudu ve vinutí statoru a  $B_{max}$  je hodnota amplitudy magnetické indukce ve vinutí.

Velikost vířivých ztrát v jednom vodiči se obecně vypočte z rovnice (66), pro výpočet ve stroji s axiálním magnetickým tokem je možné rovnici upravit na (67).

$$\Delta P_e = m_1 \cdot a_w \cdot N_1 \cdot 2 \cdot \frac{d_{cu}^4 \cdot L_i \cdot \pi^3 \cdot \sigma_{cu} \cdot f^2 \cdot B_{max}^2}{32} \quad (67)$$

Navrhovaný motor bude napájen třífázovým měničem s pulzně šířkovou modulací, s předpokladem výstupního dolnoproústného filtru. Z tohoto důvodu lze uvažovat, že navrhovaný motor bude odebírat sinusový proud.

Ztráty v permanentních magnetech byly zanedbány. Hnací motor bezucpávkového čerpadla se nachází v prostoru za oběžným kolem, přičemž celý tento prostor je vyplněn čerpanou kapalinou. Během chodu stroje dochází

k ztrátám brzdícím momentem způsobeným třením rotorů o okolní kapalinu. Tento zpětný moment vzniká na přilehlých plochách rotorových disků ke statoru (axiální vzduchová mezera) a současně mezi pláštěm rotoru a odpovídající plochou statoru čerpadla (radiální vzduchová mezera).

Celkové mechanické ztráty motoru  $\Delta P_{mech,M}$  lze vyjádřit (68) superpozicí ztrát diskových  $\Delta P_{ax}$  a ztrát vznikajících mezi rotory a kostrou čerpadla  $\Delta P_{rad}$ .

$$\Delta P_{mech,M} = \Delta P_{ax} + \Delta P_{rad} \quad (68)$$

Diskové ztráty vznikají v axiální vzduchové mezeře mezi statickou plochou vinutí a rotující plochou rotoru. Při výpočtu bude uvažováno pólové krytí jedna, tj. permanentní magnety tvoří celistvou plochu ve tvaru mezikruží. Velikost diskových ztrát bude zkoumána právě mezi plochou magnetů a odpovídající plochou statoru. Metodika výpočtu diskových ztrát byla převzata ze zdroje [41]. Postup výpočtu je následující: nejprve se rovnicí (69) určí ztráty na celém průměru rotoru  $\Delta P_{rot,o}$  a následně se od těchto ztrát odečtou ztráty (70) na vnitřním průměru rotoru  $\Delta P_{rot,i}$ .

$$\Delta P_{rot,o} = \frac{1}{4} \cdot c_{Mo} \cdot \rho_w \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60} \right)^3 \cdot \frac{D_o^5}{32} \quad (69)$$

$$\Delta P_{rot,i} = \frac{1}{4} \cdot c_{Mi} \cdot \rho_w \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60} \right)^3 \cdot \frac{D_i^5}{32} \quad (70)$$

Kde  $\rho_w$  značí měrnou hustotu vody. Dle zdroje [44] je hodnota měrné hustoty vody při 40 °C rovna 992,36 kg·m<sup>-3</sup>. Symbol  $c_{Mi}$  v rovnici (69) představuje součinitel momentu pro vnitřní průměr diskových ztrát, který se určí na základě rovnice (71). Naopak symbolem  $c_{Mo}$  v rovnici (70) je označen součinitel momentu na vnitřním průměru rotoru, ten je dán vztahem (72).

$$c_{Mo} = \left[ 3,8 \cdot \log \left( \frac{D_o}{2 \cdot k_{ax}} \right) - 2,4 \cdot \sqrt[4]{\frac{2 \cdot h_g}{D_o}} \right]^{-2} \quad (71)$$

$$c_{Mi} = \left[ 3,8 \cdot \log \left( \frac{D_i}{2 \cdot k_{ax}} \right) - 2,4 \cdot \sqrt[4]{\frac{2 \cdot h_g}{D_i}} \right]^{-2} \quad (72)$$

Koeficient drsnosti  $k_{ax}$  vystupující v rovnicích (71) a (72) je pro oba rotory shodný. Pro jeho určení slouží rovnice (73).

$$k_{ax} = 4,5 \cdot 10^{-6} \cdot R_a^{0,97} \quad (73)$$

Povrch permanentních magnetů je zpravidla pokoven. Stator bude tvořen epoxidovou zalévací hmotou. Uvažovaná drsnost povrchu  $R_a$  je 12,5 μm.

Celkové diskové ztráty dvojice rotorů  $\Delta P_{ax}$  jsou dány rovnicí (74)).

$$\Delta P_{ax} = 2 \cdot (\Delta P_{rot,o} - \Delta P_{rot,i}) \quad (74)$$

Při výpočtu ztrát vznikajících zpětným momentem třením kapaliny mezi rotory a skříní čerpadla  $\Delta P_{rad}$  je možné postupovat dle modifikovaných výpočetních

vztahů uvedených ve zdroji [42]. Při výpočtu bude uvažováno pólové krytí jedna, tj. permanentní magnety tvoří jednolitou strukturu. Celkové radiální ztráty  $\Delta P_{rad}$  jsou dány součtem radiálních ztrát obou rotorů dle (75).

$$\Delta P_{rad} = \Delta P_{rad,jho+PM} + \Delta P_{rad,PM} \quad (75)$$

Výpočet radiálních ztrát rotoru složeného z diskového jha o tloušťce  $h_r$  a permanentních magnetů s tloušťkou  $h_{PM,t}$  je prováděn pomocí rovnice (76). V případě výpočtu rotoru využívající krycí disk oběžného kola jako jho je počítáno pouze s tloušťkou permanentních magnetů  $h_{PM,t}$  dle rovnice (77).

$$\Delta P_{rad,jho+PM} = k_{rad} \cdot c_{Mrad} \cdot \pi \cdot \rho_w \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60} \right)^3 \cdot \frac{D_o^4}{32} \cdot (h_r + h_{PM,t}) \quad (76)$$

$$\Delta P_{rad,PM} = k_{rad} \cdot c_{Mrad} \cdot \pi \cdot \rho_w \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60} \right)^3 \cdot \frac{D_o^4}{32} \cdot h_{PM,t} \quad (77)$$

Kde  $c_{Mrad}$  má význam součinitele momentu tření o kapalinu, který se dále určí vztahem (78). Hodnota koeficientu tření  $k_{rad}$  byla na základě konzultace na odboru Fluidního inženýrství Viktora Kaplana zvolena jedna.

$$c_{Mrad} = 0,065 \cdot \frac{\left[ \frac{D_{ki} - D_o}{D_o} \right]^{0,3}}{Re_{cMrad}^{0,2}} \quad (78)$$

Dále neznámá hodnota Reynoldsova čísla  $Re_{cMrad}$  byla určena na základě (79).

$$Re_{cMrad} = \frac{\rho_w \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60} \cdot D_o \cdot \frac{(D_{ki} - D_o)}{2}}{2 \cdot \eta_{dw}} \quad (79)$$

Kde  $\eta_{dw}$  značí dynamickou viskozitu vody. Hodnota dynamické viskozity vody při teplotě 40 °C je dle [43]  $0,653 \cdot 10^{-3}$  Pa·s). Dále  $D_{ki}$  je vnitřní průměr kostry (statoru) čerpadla v místě uložení navrhovaného motoru (velikost  $D_{ki}$  viz Tab. 2).

Celkové ztráty vznikající v soustavě motoru s magnetickými ložisky  $\Delta P_c$  se vypočtou na základě rovnice (80). Symbolem  $\Delta P_{mech,L}$  jsou označeny ztráty třením rotorů magnetických ložisek o okolní kapalinu.

$$\Delta P_c = \Delta P_m + \Delta P_{mech,L} \quad (80)$$

Celkový příkon čerpadla ve jmenovitém bodě  $P_{1c}$  je dán rovnicí (81). Kde  $P_{ložiska}$  je výkon nutný k činnosti dvojice aktivních magnetických ložisek.

$$P_{1c} = P_2 + \Delta P_c + P_{ložiska} \quad (81)$$

**Příloha 2: Tepelný výpočet motoru s axiálním tokem a bezželezným statorem**  
Veškeré výpočtové rovnice byl převzaty ze zdroje [2]. Uvedený tepelný výpočet se odvíjí od zjednodušeného tepelné sítě AFPM motoru s bezželezným statorem, který se nachází na Obr. 56.

**Odpor přenosu tepla prouděním: stator – vzduchová mezeřa**

Odpor přenosu tepla prouděním mezi statorem a proudícím vzduchem ve vzduchové mezeře  $R_{c1}$  se určí pomocí rovnice (82).

$$R_{c1} = \frac{1}{\bar{h}_{rs} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_o^2 - D_i^2)} \quad (82)$$

Kde  $\bar{h}_{rs}$  je průměrný součinitel přestupu tepla prouděním mezi statorem a proudícím vzduchem ve vzduchové mezeře, který lze vypočítat ze vztahu (83).

$$\bar{h}_{rs} = \frac{2 \cdot k_{air}}{D_o} \cdot \overline{Nu}_{Rc1} \quad (83)$$

Neznámá hodnota průměrného Nusseltova  $\overline{Nu}_{Rc1}$  čísla se určí vztahem (84).

$$\overline{Nu}_{Rc1} = 0,333 \cdot \frac{2 \cdot Q_{vz}}{\pi \cdot v_{air} \cdot D_o} \quad (84)$$

Kde  $Q_{vz}$  představuje objemový průtok vzduchu skrze vzduchovou mezeřu. Proměnná  $v_{air}$  ve vztahu pro průměrné Nusseltovo číslo značí kinematickou viskozitu vzduchu (hodnota kinematické viskozity vzduchu při 40 °C a atmosférickém tlaku je dle [47]  $1,727 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

**Odpor přestupu tepla prouděním: vzduchová mezeřa – rotor**

Přestup tepla prouděním mezi vzduchovou mezerou a rotorovým diskem lze považovat za totožný případ, jako přestup tepla prouděním ze statoru do vzduchové mezery. Na základě této úvahy lze zapsat pro odpor přestupu tepla prouděním mezi vzduchovou mezerou a rotorem  $R_{c2}$  rovnost (85).

$$R_{c1} = R_{c2} \quad (85)$$

**Odpor přestupu tepla prouděním: vnější plocha rotoru – okolní prostředí**

Hodnotu odporu přestupu tepla prouděním na vnější ploše rotorového disku  $R_{c3}$  je možné určit na základě vztahu (86).

$$R_{c3} = \frac{4}{\bar{h}_{fr} \cdot \pi \cdot D_o^2} \quad (86)$$

Kde  $\bar{h}_{fr}$  je průměrný součinitel přestupu tepla prouděním na vnější ploše rotorového disku, který lze vypočítat za pomoci vztahu (87).

$$\bar{h}_{fr} = \frac{2 \cdot k_{air}}{D_o} \cdot \overline{Nu}_{Rc3} \quad (87)$$

Pro získání velikosti průměrného Nusseltova  $\overline{Nu}_{Rc3}$  čísla je nejprve nutné rozhodnout, zda se jedná o laminární proudění případně o kombinace laminárního

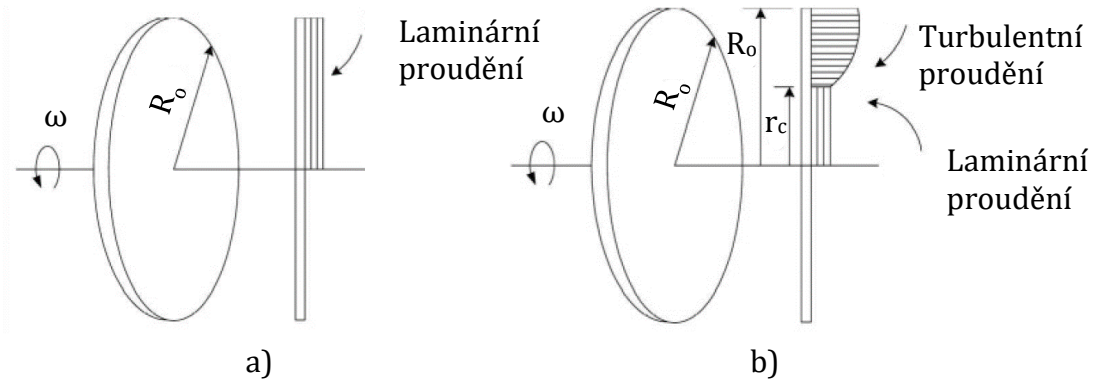
s turbulentním prouděním. Rozhodující je poměr poloměru  $r_c$  a vnějšího poloměru rotorového disku  $R_o$ . Velikost poloměru  $r_c$  je dána vztahem (88).

$$r_c = \sqrt{\frac{2,5 \cdot 10^5 \cdot \nu_{air}}{\omega_n}} \quad (88)$$

Úhlová rychlost  $\omega_n$  při jmenovitých otáčkách se vypočte dle (89).

$$\omega_n = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_n}{60} \quad (89)$$

V případě poměru  $r_c > R_o$  jedná se o zcela laminární proudění a průměrné Nusseltovo číslo se určí pomocí rovnice (91). Naopak pokud  $r_c < R_o$  jde o přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním a průměrné Nusseltovo číslo se určí vztahem (92). Názorná situace je zobrazena na Obr. 67.



**Obr. 67: Proudění a) laminární, b) laminární – turbulentní (upraveno z [2])**

Reynoldsovo číslo  $Re_{Rc3}$  má stejnou hodnotu pro oba případy proudění, a tedy v obou rovnicích (91) a (92) pro výpočet Nusseltova čísla se využije vztah (90). Kde  $\eta_{dair}$  je dynamická viskozita vzduchu (hodnota dynamické viskozity vzduchu je při 40 °C a atmosférickém tlaku dle [47] 19,2  $\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ).

$$Re_{Rc3} = \rho_{air} \cdot \frac{\omega_n \cdot D_o^2}{4 \cdot \eta_{dair}} \quad (90)$$

$$\overline{Nu}_{Rc3} = \frac{2}{5} \cdot \sqrt[4]{Re_{Rc3}^2 + \frac{\beta_{air} \cdot g \cdot D_o^3 \cdot \sqrt{\pi^3} \cdot (\vartheta_r - \vartheta_0)}{9 \cdot \nu_{air}^2}} \quad (91)$$

$$\overline{Nu}_{Rc3} = 0,015 \cdot \sqrt[5]{Re_{Rc3}^4 - 100 \cdot \left(\frac{2 \cdot r_c}{D_o}\right)^2} \quad (92)$$

Kde  $g$  je gravitační zrychlení (9,81  $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ),  $\beta_{air}$  značí součinitel objemové roztažnosti vzduchu (hodnota součinitele objemové roztažnosti vzduchu při 40 °C a atmosférickém tlaku je  $3,2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  dle [47]).

Rovnice (91) je závislá na teplotním rozdílu teploty rotorového disku  $\nu_r$  a teploty okolního prostředí  $\nu_0$ . Při řešení je nezbytné zohlednit skutečnost změny odporu  $R_{c3}$  s teplotou (viz příloha 5 – zápis řešení v software Matlab).

### **Odpor přestupu tepla prouděním: vnější okraj rotoru – okolní prostředí**

Odpor přestupu tepla prouděním na vnější okraji rotorového disku  $R_{c3p}$  se určí pomocí rovnice (93).

$$R_{c3p} = \frac{1}{\bar{h}_p \cdot \pi \cdot D_o \cdot (h_r + \alpha_{PM} \cdot h_{PM,t})} \quad (93)$$

Kde  $\bar{h}_p$  je průměrný součinitel přestupu tepla prouděním na vnější ploše rotorového disku, který lze vypočítat za pomoci vztahu (94).

$$\bar{h}_p = \frac{k_{air}}{D_o} \cdot \overline{Nu}_{Rc3p} \quad (94)$$

Neznámá hodnota průměrného Nusseltova čísla  $\overline{Nu}_{Rc3p}$  se určí vztahem (95). Dále proměnná  $k_{air}$  značí tepelnou vodivost vzduchu, jejíž hodnota při 40 °C a atmosférickém tlaku je dle zdroje [47] 26,5 mW·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>.

$$\overline{Nu}_{Rc3p} = 0,133 \cdot \sqrt[3]{Re_{Rc3p}^2 \cdot Pr} \quad (95)$$

Prandtlovo číslo  $Pr$  nabývá při atmosférickém tlaku a teplotě 40 °C hodnoty 0,711 dle [47]. Neznámá hodnota Reynoldsova čísla  $Re_{Rc3p}$  se vypočte vztahem (96).

$$Re_{Rc3p} = \omega_n \cdot \frac{D_o^2}{v_{air}} \quad (96)$$

### **Odpor přestupu tepla sáláním: stator – rotor**

Pro výpočet odporu přestupu tepla sáláním mezi statorem a rotorovými disky  $R_{r1}$  platí rovnice (97).

$$R_{r1} = \frac{\frac{1 - \varepsilon_s}{\varepsilon_s \cdot S_s} + \frac{1}{S_s \cdot F_{sr}} + \frac{1 - \varepsilon_r}{\varepsilon_r \cdot S_r}}{\sigma_{SB} \cdot [(v_s + 273) + (v_r + 273)] \cdot [(v_s + 273)^2 + (v_r + 273)^2]} \quad (97)$$

Emisivita statoru  $\varepsilon_s$  je dána emisivitou materiálu, který se nachází na povrchu. V případě zalití vinutí do epoxydové pryskyřice je velikost emisivity 0,85 dle literatury [2]. Rotory se skládají ze dvou materiálů. Na železném nosném disku je umístěna sada osmi permanentních magnetů. Díky pólóvému krytí menšímu, než jedna dochází ke střídání povrchu magnetů a nosného disku. Dle [2] emisivita železa  $\varepsilon_{Fe}$  nabývá hodnoty 0,3 a emisivita permanentních magnetů ve složení neodým železo bór  $\varepsilon_{PM}$  je 0,9. Celková emisivita rotoru je pak dána rovnicí (98).

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{Fe} \cdot \alpha_{PM} + \varepsilon_{PM} \cdot (1 - \alpha_{PM}) \quad (98)$$

Dále  $S_s$  značí plochu statoru, která vyzařuje do plochy rotoru  $S_r$ . Ve výpočtu je uvažována shodná plocha rotoru i statoru. Plocha statoru je dána rovnicí (99).

$$S_s = \pi \cdot \left( \frac{D_o}{2} - \frac{D_i}{2} \right)^2 \quad (99)$$

### **Sestavení rovnic dle principu I. Kirchhoffova zákona:**

Pro získání hledaných teplot jednotlivých částí stroje je nutné aplikovat na zjednodušenou tepelnou síť na Obr. 56 princip I. Kirchhoffova zákona. Tepelné

zdroje dodávají pouze poloviční velikost ztrát, neboť je řešena pouze polovina stroje. Pro uzel s teplotou  $v_s$  platí rovnice (100).

$$\frac{1}{2} \cdot (\Delta P_{j1} + \Delta P_e) - \frac{v_s - v_{vz}}{R_{c1}} - \frac{v_s - v_r}{R_{r1}} = 0 \quad (100)$$

Dále je možné zapsat rovnici (101) pro uzel s hledanou teplotou  $v_r$ .

$$\frac{v_{vz} - v_r}{R_{c2}} + \frac{v_s - v_r}{R_{r1}} + \frac{1}{2} \cdot \Delta P_{rot} - \frac{v_r - v_0}{R_{c3}} - \frac{v_r - v_0}{R_{c3p}} = 0 \quad (101)$$

Pro vyřešení trojice hledaných teplot  $v_s$ ,  $v_{vz}$  a  $v_r$  je zapotřebí zapsat třetí rovnici pro uzel s teplotou  $v_{vz}$ . Výchozím bodem pro zápis je tepelný tok  $\dot{Q}_{vz}$  mezi vzduchem na vstupu do vzduchové mezery o teplotě  $v_{in}$  a místem výstupu vzduchu ze vzduchové mezery o teplotě  $v_{out}$ . Pro tento tepelný tok lze zapsat rovnici (102).

$$\dot{Q}_{vz} = \dot{m}_{vz} \cdot c_{p,air} \cdot (v_{out} - v_{in}) \quad (102)$$

Kde  $\dot{m}_{vz}$  je hmotnostní průtok vzduchu přes vzduchovou mezeru,  $c_{p,air}$  značí tepelnou kapacitu vzduchu při konstantním tlaku (dle [47] je hodnota tepelné kapacity vzduchu při 40 °C a atmosférickém tlaku rovna 1013 J·Kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>). Teplota na vstupu  $v_{in}$  odpovídá teplotě prostředí  $v_0$ . Průměrná teplota uvnitř vzduchové mezery  $v_{vz}$  je dána vztahem (103).

$$v_{vz} = \frac{1}{2} \cdot (v_{out} + v_{in}) = \frac{1}{2} \cdot (v_{out} + v_0) \quad (103)$$

Následně lze rovnici (103) dosadit do rovnice (102). Výsledná rovnice po úpravě má tvar (104).

$$\dot{Q}_{vz} = 2 \cdot \dot{m}_{vz} \cdot c_{pvz} \cdot (v_{vz} - v_0) \quad (104)$$

Hmotnostní průtok vzduchu skrze vzduchovou mezeru  $\dot{m}_{vz}$  se určí z objemového průtoku vzduchu  $Q_{vz}$  skrze ventilační otvory (viz rovnice (105)).

$$\dot{m}_{vz} = Q_{vz} \cdot \rho_{air} \quad (105)$$

Kde  $\rho_{air}$  je hustota vzduchu (hodnota hustoty vzduchu při 40 °C a atmosférickém tlaku je dle [47] 1,11 kg·m<sup>-3</sup>). Dále pro velikost objemového průtoku platí rovnice (106).

$$Q_{vz} = v_{chl} \cdot n_{chl} \cdot S_{chl} \quad (106)$$

Kde  $v_{chl}$  je rychlost proudění vzduchu skrze chladicí díry,  $n_{chl}$  je počet chladicích děr v rotorovém disku (počet viz Tab. 16) a  $S_{chl}$  je plocha každé chladicí díry daná rovnicí (107). Kde  $D_{chl}$  je průměr chladicí díry (velikost viz Tab. 16).

$$S_{chl} = \pi \cdot \frac{D_{chl}^2}{4} \quad (107)$$

Aplikací principu I. Kirchhoffova zákona v tepelném schématu na Obr. 56 v uzlu s teplotou  $v_{vz}$ , při uvažování tepelného toku ve vzduchové mezeře se získá rovnice (108). Při řešení je nutné zohlednit závislost rovnice na teplotním rozdílu vzduchové mezery  $v_{vz}$  a okolního prostředí  $v_0$  (viz příloha 5 – zápis v Matlabu).

$$\frac{v_s - v_{vz}}{R_{c1}} - \frac{v_{vz} - v_r}{R_{c2}} - \dot{Q}_{vz} = 0 \quad (108)$$

### **Nalezení řešení pro hledané teploty $v_s$ , $v_{vz}$ a $v_r$**

Výše uvedeným způsobem byl získán soubor třech lineárních rovnic o třech neznámých (hledaných) teplotách:  $v_s$ ,  $v_{vz}$  a  $v_r$ . Pro řešení lze využít některou z iteračních metod pro řešení soustavy lineárních rovnic. V této práci byla pro nalezení teplot využita Gauss Seidlova metoda, kompletní zápis v prostředí Matlab se nachází v příloze 5. Pro využití Gauss Seidlovy metody je nejprve nutné upravit rovnice (100), (101) a (108) do tvaru pro maticový zápis (viz rovnice (109), (110) a (111)).

$$\left(\frac{1}{R_{c1}} + \frac{1}{R_{r1}}\right) \cdot v_s - \frac{1}{R_{c1}} \cdot v_{vz} - \frac{1}{R_{r1}} \cdot v_r = \frac{1}{2} \cdot (\Delta P_{j1} + \Delta P_e) \quad (109)$$

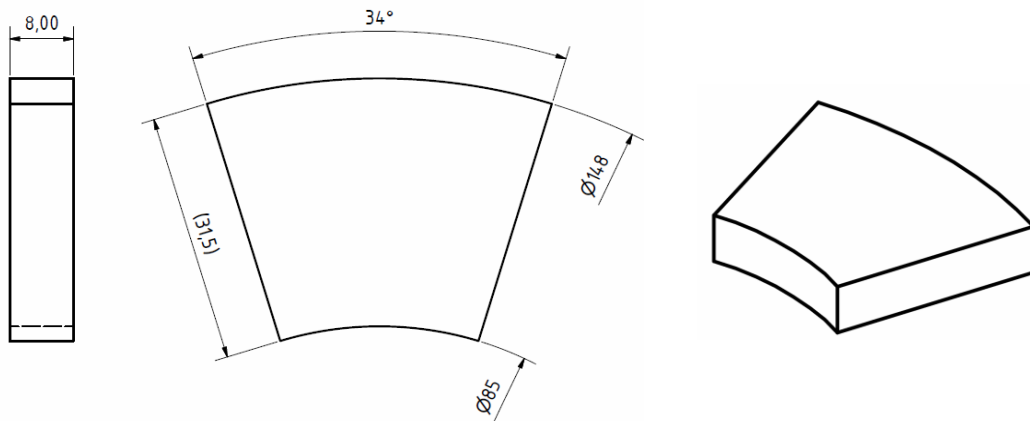
$$\frac{1}{R_{c1}} \cdot v_s - \left(\frac{1}{R_{c1}} + \frac{1}{R_{c2}} + K\right) \cdot v_{vz} + \frac{1}{R_{c2}} \cdot v_r = -\dot{Q}_{vz} \cdot v_0 \quad (110)$$

$$\frac{1}{R_{r1}} v_s + \frac{1}{R_{c2}} v_{vz} - \left(\frac{1}{R_{c2}} + \frac{1}{R_{r1}} + \frac{1}{R_{c3}} + \frac{1}{R_{c3p}}\right) v_r = -\frac{1}{2} \Delta P_{rot} - \left(\frac{1}{R_{c3}} + \frac{1}{R_{c3p}}\right) v_0 \quad (111)$$

Rovnice (112) představuje zápis rovnic (109), (110) a (111) do maticové podoby.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{R_{c1}} + \frac{1}{R_{r1}} & -\frac{1}{R_{c1}} & -\frac{1}{R_{r1}} \\ \frac{1}{R_{c1}} & -\left(\frac{1}{R_{c1}} + \frac{1}{R_{c2}} + \dot{Q}_{vz}\right) & \frac{1}{R_{c2}} \\ \frac{1}{R_{r1}} & \frac{1}{R_{c2}} & -\left(\frac{1}{R_{c2}} + \frac{1}{R_{r1}} + \frac{1}{R_{c3}} + \frac{1}{R_{c3p}}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_s \\ v_{vz} \\ v_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cdot (\Delta P_{j1} + \Delta P_e) \\ -\dot{Q}_{vz} \cdot v_0 \\ -\left(\frac{1}{2} \Delta P_{rot} + \left(\frac{1}{R_{c3}} + \frac{1}{R_{c3p}}\right) v_0\right) \end{bmatrix} \quad (112)$$

### **Příloha 3: Náčrtek permanentního magnetu**



## Příloha 4: Katalogový list permanentního magnetu N52M (převzato z [23])



### N52M

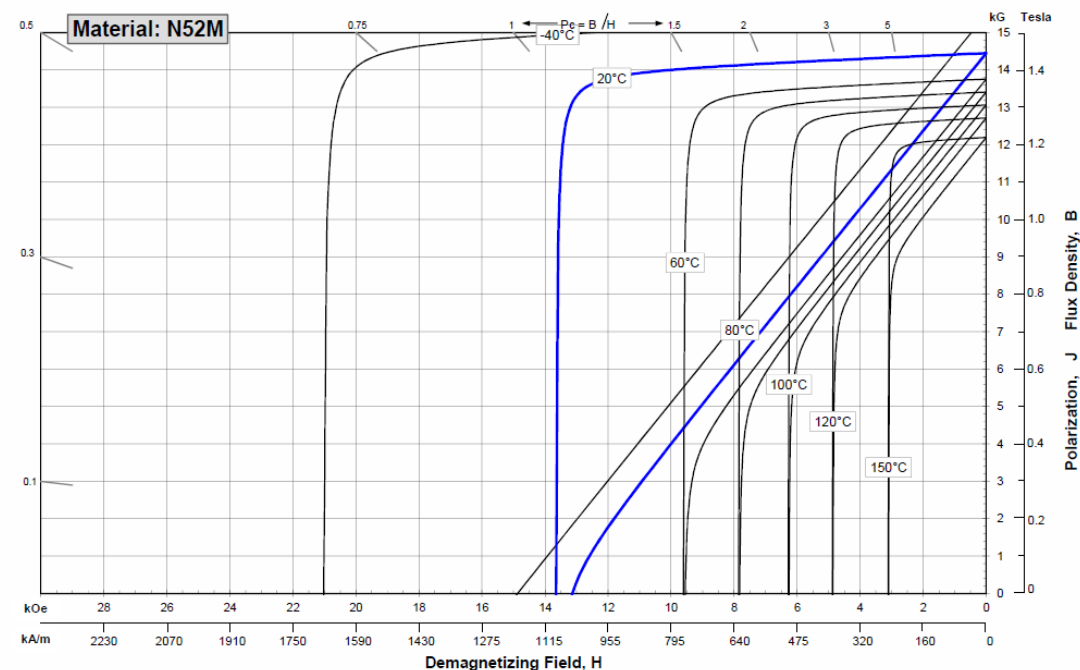
#### Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets

These are also referred to as "Neo" or NdFeB magnets. They offer a combination of high magnetic output at moderate cost. Please contact Arnold for additional grade information and recommendations for protective coating. Assemblies using these magnets can also be provided.

| Characteristic                                   | Units             | min.   | nominal | max.   |
|--------------------------------------------------|-------------------|--------|---------|--------|
| <b>Br</b> , Residual Induction                   | Gauss             | 14,200 | 14,450  | 14,700 |
|                                                  | mT                | 1420   | 1445    | 1470   |
| <b>H<sub>cB</sub></b> , Coercivity               | Oersteds          | 12,500 | 13,250  | 14,000 |
|                                                  | kA/m              | 995    | 1054    | 1114   |
| <b>H<sub>cJ</sub></b> , Intrinsic Coercivity     | Oersteds          | 13,000 |         |        |
|                                                  | kA/m              | 1,035  |         |        |
| <b>BH<sub>max</sub></b> , Maximum Energy Product | MGoe              | 49     | 51      | 53     |
|                                                  | kJ/m <sup>3</sup> | 390    | 406     | 422    |

| Characteristic     | Units                                              | C //                           | C ⊥        |
|--------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------|------------|
| Thermal Properties | Reversible Temperature Coefficients <sup>(1)</sup> |                                |            |
|                    | of Induction, α(Br)                                | %/°C                           | -0.120     |
|                    | of Coercivity, α(H <sub>cJ</sub> )                 | %/°C                           | -0.675     |
|                    | Coefficient of Thermal Expansion <sup>(2)</sup>    | ΔL/L per °C x 10 <sup>-6</sup> | 7.5   -0.1 |
| Other Properties   | Thermal Conductivity                               | W / (m • K)                    | 7.6        |
|                    | Specific Heat <sup>(3)</sup>                       | J / (kg • K)                   | 460        |
|                    | Curie Temperature, T <sub>c</sub>                  | °C                             | 310        |
|                    | Flexural Strength                                  | psi                            | 41,300     |
|                    |                                                    | MPa                            | 285        |
|                    | Density                                            | g/cm <sup>3</sup>              | 7.5        |
|                    | Hardness, Vickers                                  | Hv                             | 620        |
|                    | Electrical Resistivity, ρ                          | μΩ • cm                        | 180        |

Notes: (1) Coefficients measured between 20 and 100 °C  
(2) Between 20 and 200 °C  
(3) Between 20 and 140 °C



1 kA/m = 12.566 Oe 1 kOe = 79.577 kA/m

**Notes** The material data and demagnetization curves shown above represent typical properties that may vary due to product shape and size. Magnets can be supplied thermally stabilized or magnetically calibrated to customer specifications. Additional grades are available. Please contact the factory for information.

## Příloha 5: Zdrojový kód pro software Matlab – výpočet tepelné sítě

```

clc
clear all
%%definice vstupnich hodnot:
%%ztraty
% vstup.ztraty.deltaPe=3; %virive ztraty ve statorovem vinuti [W]
% vstup.ztraty.deltaPlw=37; %Jouleovy ztraty ve statorovem vinuti [W]
% vstup.ztraty.deltaProt=0.1; %rotacni ztraty [W]

%%rozmary:
vstup.rozmary.Din=0.0854; %vnitrni prumer [m]
vstup.rozmary.Dout=0.148; %vnejsi prumer [m]
vstup.rozmary.Dhridel=0.02; %prumer hridele [m]
vstup.rozmary.d=0.010; %tloustka rotoroveho disku [m]
vstup.rozmary.tloustka_PM=0.008; %tloustka PM [m]
vstup.rozmary.vz=4*10^-3; %sirka vzduchove mezery [m]
vstup.rozmary.d_chl_der=10*10^-3; %prumer chladici diry [m]
vstup.rozmary.pocet_chl_der=8; %pocet chladicich der [-]

%%parametry:
vstup.parametry.rychlost_air=1.5; %rychlost proudeni vzduchu [m/s]
vstup.parametry.alfa=0.756; %polove kryti permanentnich magnetu [-]
vstup.parametry.theta0=40; %okolni teplota [°C]
vstup.parametry.n=1450; %pocet otacek [ot/min]
vstup.parametry.odpor=5.46;
vstup.parametry.proud=1.5;
vstup.parametry.vodivost=56.5*10^6/(1+0.00393*(120-20));

%%soucinitele:
vstup.soucinitele.g=9.81; %tíhové zrychlení [m/s^2]
vstup.soucinitele.beta=3.2*10^-3; %soucinatel pro laminarni proudeni [1/K]
vstup.soucinitele.ny=1.727*10^-5; %kinematicka viskozita vzduchu [m^2/s]
vstup.soucinitele.k=0.0265; %tepelná vodivost vzduchu [W/(m°C)]
vstup.soucinitele.epsilon_stator=0.85; %emisivita epoxidu (stator s vinutim) [-]
vstup.soucinitele.epsilon_Fe=0.3; %emisivita zeleza [-]
vstup.soucinitele.epsilon_PM=0.9; %emisivita permanentního magnetu [-]
vstup.soucinitele.F12=1; %tvarový faktor [-]
vstup.soucinitele.sigma=5.67*10^-8; %Stefan-Boltzmannova konstanta [W/(m^2 K^4)]
vstup.soucinitele.Pr=0.727; %Prandtlovo číslo [-]
vstup.soucinitele.mi=1.92*10^-5; %dynamická viskozita vzduchu [Pa s]
vstup.soucinitele.roo=1.177; %hustota vzduchu [kg/m^3]
vstup.soucinitele.cp=1013; %měrná tepelná kapacita při konst.tlaku [J/(kg K)]

%%odhad
vstup.odhad.theta1=120; %odhad teploty vinuti statoru [°C]
vstup.odhad.theta2=50; %odhad teploty ve vz. mezere [°C]
vstup.odhad.theta3=45; %odhad teploty rotoroveho disku [°C]

%%vstupy pro vytvoreni grafickych zavislosti
hodnoty_n=[0.0001,1,20:20:100,150:50:2000];
hodnoty_v=[1.5];
%hodnoty_i=[1.5];

[~,yy]=size(hodnoty_v);
for dd=1:yy
vstup.parametry.rychlost_air=hodnoty_v(dd);
[~,y]=size(hodnoty_n);
%[~,y]=size(hodnoty_i);
for d=1:y
vstup.parametry.n=hodnoty_n(d);
%vstup.parametry.proud=hodnoty_i(d);

%%vypocet hodnot:
%uhlova rychlost [rad/s]
dopocet.parametry.omega=2*pi*vstup.parametry.n/60;
%%ztraty
%virive ztraty ve statorovem vinuti [W]
vstup.ztraty.deltaPe=(4.5144e-12*vstup.parametry.vodivost)*(vstup.parametry.n/60*4)^2;
%Jouleovy ztraty ve statorovem vinuti [W]
vstup.ztraty.deltaPlw=3*vstup.parametry.odpor*vstup.parametry.proud^2;
%rotacni ztraty [W]

```

```

dopocet.soucinitele.ReCf=(dopocet.parametry.omega*vstup.soucinitele.roo*vstup.rozmary.Do
ut^2)/(4*vstup.soucinitele.mi);
vstup.soucinitele.Cf=3.87*dopocet.soucinitele.ReCf^(-1/2);
vstup.ztraty.deltaProt=0.5*vstup.soucinitele.Cf*vstup.soucinitele.roo*dopocet.parametry.
omega^3*((vstup.rozmary.Dout/2)^5-(vstup.rozmary.Dhridel^5/2));
%%parametry
%objemovy prtok vzduchu [m^3/s]
vstup.parametry.Q=vstup.parametry.rychlost_air*vstup.rozmary.pocet_chl_der*pi()* (vstup.r
ozmary.d_chl_der/2)^2;
%hmotnostni prtok vzduchu vz. mezerou [kg/s]
dopocet.parametry.Qm=vstup.soucinitele.roo*vstup.parametry.Q;

%%soucinitele:
%Reynoldsovo cislo na vnejsi plose rotoroveho disku [-]
dopocet.soucinitele.Re=vstup.soucinitele.roo*dopocet.parametry.omega*vstup.rozmary.Dout^
2/(4*vstup.soucinitele.mi);
%prechod mezi laminarnim a turbulentnim proudenim [-]
dopocet.soucinitele.rc=(2.5*10^5*vstup.soucinitele.ny/dopocet.parametry.omega)^(1/2);
%overovací podminka proudeni
if dopocet.soucinitele.rc<(vstup.rozmary.Dout/2);
disp('rc<Dout/2 - OK - kombinace laminarniho a turbulentniho prudení');
else disp('rc>Dout/2 - POZOR!!! - laminarni proudeni'),end
%Reynoldsovo cislo na obvodu disku [-]
dopocet.soucinitele.ReD=dopocet.parametry.omega*(vstup.rozmary.Dout^2/(vstup.soucinitele
.ny));
%prumerne Nuseltovo cislo pro rotor-stator [-]
dopocet.soucinitele.Nu_rs=0.333*vstup.parametry.Q/(pi*vstup.soucinitele.ny*(vstup.rozmer
y.Dout/2));
%prumerne Nuseltovo cislo pro obvod disku [-]
dopocet.soucinitele.Nu_p=0.133*dopocet.soucinitele.ReD^(2/3)*vstup.soucinitele.Pr^(1/3);
%prumerne Nuseltovo cislo pro vnejsi plochu rotoroveho disku [-]
if dopocet.soucinitele.rc<(vstup.rozmary.Dout/2);
dopocet.soucinitele.Nu_fr=0.015*dopocet.soucinitele.Re^(4/5)-
100*(2*dopocet.soucinitele.rc/vstup.rozmary.Dout)^2;
else
dopocet.soucinitele.Gr=(vstup.soucinitele.beta*vstup.soucinitele.g*(vstup.rozmary.Dout/2
)^3*pi^(3/2)*(vstup.odhad.theta3-vstup.parametry.theta0))/vstup.soucinitele.ny^2;
dopocet.soucinitele.Nu_fr=2/5*(dopocet.soucinitele.Re^2+dopocet.soucinitele.Gr)^0.25;;
end
%prumerny soucinitel prestupu tepla pro vnejsi plochu rotoroveho disku [m^2 °C]
dopocet.soucinitele.hfr=vstup.soucinitele.k*dopocet.soucinitele.Nu_fr/(vstup.rozmary.Dou
t/2);
%prumerny soucinitel prestupu tepla pro obvod disku [m^2 °C]
dopocet.soucinitele.hp=vstup.soucinitele.k*dopocet.soucinitele.Nu_p/vstup.rozmary.Dout;
%prumerny soucinitel prestupu tepla mezi dvema disky [m^2 °C]
dopocet.soucinitele.hrs=2*vstup.soucinitele.k*dopocet.soucinitele.Nu_rs/vstup.rozmary.Do
ut;
%emisivita rotoru (disk+magnety) [-]
dopocet.soucinitele.epsilon_rotor=vstup.soucinitele.epsilon_Fe*vstup.parametry.alfa+vstu
p.soucinitele.epsilon_PM*(1-vstup.parametry.alfa);

%%rozmary
dopocet.rozmary.A=pi/4*(vstup.rozmary.Dout^2-vstup.rozmary.Din^2); %plocha disku
[mm^2]

%%vystup
%odpor prenosu tepla vedenim mezi statorem a proudicim vzduchem ve vz. mezere [°C/W]
vystup.odpory.Rc1=1/(dopocet.soucinitele.hrs*pi/4*(vstup.rozmary.Dout^2-
vstup.rozmary.Din^2));
%odpor prenosu tepla vedenim mezi proudicim vzduchem ve vz. mezere a rotorem [°C/W]
vystup.odpory.Rc2=vystup.odpory.Rc1;
%odpor prenosu tepla vedenim na vnejsi plose rotoroveho disku [°C/W]
vystup.odpory.Rc3=4/(dopocet.soucinitele.hfr*pi*vstup.rozmary.Dout^2);
%odpor prenosu tepla vedenim na obvodu disku [°C/W]
vystup.odpory.Rc3p=1/(dopocet.soucinitele.hp*pi*vstup.rozmary.Dout*(vstup.rozmary.d+vstu
p.parametry.alfa*vstup.rozmary.tloustka_PM));

%%Gauss Seidelova metoda reseni lin. rovník
dopocet.soucinitele.dva_Qm_cp=2*dopocet.parametry.Qm*vstup.soucinitele.cp;

%%matice
x=[
(vstup.odhad.theta1);
(vstup.odhad.theta2);

```

```

(vstup.odhad.theta3);
];

vystup.teploty.theta1=x(1,1);      %teplota vinuti statoru [°C]
vystup.teploty.theta2=x(2,1);      %teplota ve vz. mezere [°C]
vystup.teploty.theta3=x(3,1);      %teplota rotoroveho disku [°C]

vystup.odpory.Rr1=((1-
vstup.soucinitele.epsilon_stator)/(vstup.soucinitele.epsilon_stator*dopocet.rozmary.A))+
(1/(dopocet.rozmary.A*vstup.soucinitele.F12))+((1-
dopocet.soucinitele.epsilon_rotor)/(dopocet.soucinitele.epsilon_rotor*dopocet.rozmary.A)
))/ (vstup.soucinitele.sigma*((vystup.teploty.theta1+273)+(vystup.teploty.theta3+273))*((
vystup.teploty.theta1+273)^2+(vystup.teploty.theta3+273)^2));

A=[
(1/vystup.odpory.Rc1+1/vystup.odpory.Rr1),-(1/vystup.odpory.Rc1),-(1/vystup.odpory.Rr1);
(1/vystup.odpory.Rc1),-
(1/vystup.odpory.Rc1+1/vystup.odpory.Rc2+dopocet.soucinitele.dva_Qm_cp),(1/vystup.odpory
.Rc1);
(1/vystup.odpory.Rr1),(1/vystup.odpory.Rc2),-
(1/vystup.odpory.Rc2+1/vystup.odpory.Rr1+1/vystup.odpory.Rc3+1/vystup.odpory.Rc3p);
];

b=[
(0.5*(vstup.zraty.deltaPlw+vstup.zraty.deltaPe));
-(dopocet.soucinitele.dva_Qm_cp*vstup.parametry.theta0);
-
(0.5*vstup.zraty.deltaProt+(1/vystup.odpory.Rc3+1/vystup.odpory.Rc3p)*vstup.parametry.t
heta0);
];

%%reseni
n=size(x,1);
normVal=Inf;
tol=1e-3;
GaussItr=0;

plotGauss=[];
while normVal>tol
    x_old=x;

    for i=1:n

        sigma=0;

        for j=1:i-1
            sigma=sigma+A(i,j)*x(j);
        end

        for j=i+1:n
            sigma=sigma+A(i,j)*x_old(j);
        end

        x(i)=(1/A(i,i))*(b(i)-sigma);

        vystup.teploty.theta1=x(1,1);
        vystup.teploty.theta2=x(2,1);
        vystup.teploty.theta3=x(3,1);

    end

    if dopocet.soucinitele.rc>(vstup.rozmary.Dout/2);
        dopocet.soucinitele.Gr=(vstup.soucinitele.beta*vstup.soucinitele.g*(vstup.rozmary.Dout/2
)^3*pi^(3/2)*(vstup.teploty.theta3-vstup.parametry.theta0))/vstup.soucinitele.ny^2;
        dopocet.soucinitele.Nu_fr=2/5*(dopocet.soucinitele.Re^2+dopocet.soucinitele.Gr)^0.25;
        dopocet.soucinitele.hfr=vstup.soucinitele.k*dopocet.soucinitele.Nu_fr/(vstup.rozmary.Dou
t/2);
        vystup.odpory.Rc3=4/(dopocet.soucinitele.hfr*pi*vstup.rozmary.Dout^2);
    end
    vystup.parametry.vodivost=56.5*10^6/(1+0.00393*(vystup.teploty.theta1-20));
    vystup.parametry.odpor=5.0570*(1+3.93*10^-3*(vystup.teploty.theta1-20));
    vystup.zraty.deltaPlw=3*vstup.parametry.odpor*vstup.parametry.proud^2;

```

```

vystup.odpory.Rr1=((1-
vstup.soucinitele.epsilon_stator)/(vstup.soucinitele.epsilon_stator*dopocet.rozmary.A))+
(1/(dopocet.rozmary.A*vstup.soucinitele.Fl2))+((1-
dopocet.soucinitele.epsilon_rotor)/(dopocet.soucinitele.epsilon_rotor*dopocet.rozmary.A)
))/ (vstup.soucinitele.sigma*((vystup.teploty.theta1+273)+(vystup.teploty.theta3+273))*((
vystup.teploty.theta1+273)^2+(vystup.teploty.theta3+273)^2));

A=[
(1/vystup.odpory.Rc1+1/vystup.odpory.Rr1),-(1/vystup.odpory.Rc1),-(1/vystup.odpory.Rr1);
(1/vystup.odpory.Rc1),-
(1/vystup.odpory.Rc1+1/vystup.odpory.Rc2+dopocet.soucinitele.dva_Qm_cp),(1/vystup.odpory
.Rc1);
(1/vystup.odpory.Rr1),(1/vystup.odpory.Rc2),-
(1/vystup.odpory.Rc2+1/vystup.odpory.Rr1+1/vystup.odpory.Rc3+1/vystup.odpory.Rc3p);
];

b=[
(0.5*(vstup.ztraty.deltaPlw+vstup.ztraty.deltaPe));
-(dopocet.soucinitele.dva_Qm_cp*vstup.parametry.theta0);
-
(0.5*vstup.ztraty.deltaProt+(1/vystup.odpory.Rc3+1/vystup.odpory.Rc3p)*vstup.parametry.t
heta0);
];

GaussItr=GaussItr+1;
normVal=norm(x_old-x);
plotGauss=[plotGauss;normVal];
end
fprintf('\n%.3f °C - teplota vinuti statoru\n%.3f °C - teplota ve vz. mezere\n%.3f °C -
teplota rotoroveho disku in %d iterations',x,GaussItr);

%%vypis hodnot otepleni v zavislosti na rychlosti proudeni vzduchu
% excel(1,dd) = hodnoty_v(1,dd);
% excel(2,dd) = x(1,1)-40;
% excel(3,dd) = x(2,1)-40;
% excel(4,dd) = x(3,1)-40;

%%vypis hodnot otepleni v zavislosti na proudu
% excel(1,d) = hodnoty_i(1,d);
% excel(2,d) = x(1,1)-40;
% excel(3,d) = x(2,1)-40;
% excel(4,d) = x(3,1)-40;

%%vypis hodnot otepleni v zavislosti na otackach
excel(1,d) = hodnoty_n(1,d);
excel(2,d) = x(1,1)-40;
excel(3,d) = x(2,1)-40;
excel(4,d) = x(3,1)-40;

%%vypis hodnot otepleni statoru v zavislosti na proudu a rychlosti proudeni vzduchu
% excel_s(dd+1,d+1) = x(1,1)-40;
% excel_s(dd+1,1) = hodnoty_v(1,dd);
% excel_s(1,d+1) = hodnoty_i(1,d);
end
end
%%%zkouska
%%vypocet parametru pro overeni vypoctem
zkouska.qdeltaP=vstup.ztraty.deltaProt+vstup.ztraty.deltaPe+vstup.ztraty.deltaPlw;
zkouska.qRr1=(vystup.teploty.theta1-vystup.teploty.theta3)/vystup.odpory.Rr1;
zkouska.qRc1=(vystup.teploty.theta1-vystup.teploty.theta2)/vystup.odpory.Rc1;
zkouska.qRc2=(vystup.teploty.theta2-vystup.teploty.theta3)/vystup.odpory.Rc2;
zkouska.qRc3=(vystup.teploty.theta3-vstup.parametry.theta0)/vystup.odpory.Rc3;
zkouska.qRc3p=(vystup.teploty.theta3-vstup.parametry.theta0)/vystup.odpory.Rc3p;
zkouska.qQ=dopocet.soucinitele.dva_Qm_cp*(vystup.teploty.theta2-vstup.parametry.theta0);
%%zkouska - overeni vstupnich a vystupnich tepelných toku
zkouska.balance=0.5*(zkouska.qdeltaP)-zkouska.qRc3p-zkouska.qRc3-zkouska.qQ;
%%zkouska - zpetne dosazeni do vychozich rovnic
zkouska.rovnicel=0.5*(vstup.ztraty.deltaPe+vstup.ztraty.deltaPlw)-zkouska.qRc1-
zkouska.qRr1;
zkouska.rovnice2=zkouska.qRc1-zkouska.qRc2-zkouska.qQ;
zkouska.rovnice3=zkouska.qRc2+zkouska.qRr1+0.5*vstup.ztraty.deltaProt-zkouska.qRc3-
zkouska.qRc3p;

```