



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

TEPELNÝ MODEL SYNCHRONNÍHO MOTORU S PERMANENTNÍMI MAGNETY S PŘÍMÝM PŘIPOJENÍM NA SÍŤ

THERMAL MODEL OF LINE-START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub

Súkeník

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Toman

BRNO 2023

Diplomová práce

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

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Jakub Súkeník

ID: 209145

Ročník: 2

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Teplotný model synchronního motoru s permanentními magnety s přímým připojením na síť

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Nastudujte a popište konstrukci synchronních strojů spouštěných ze sítě.
2. Nastudujte a popište vztahy pro výpočet tepelných odporů jednotlivých částí synchronního stroje spouštěného ze sítě.
3. Vytvořte kompletní tepelný model synchronního stroje spouštěného ze sítě.
4. Proveďte laboratorní měření na reálném vzorku synchronního stroje spouštěného ze sítě.
5. Porovnejte vypočtené teploty s měřenými a v případě potřeby proveďte korekci tepelného modelu pro dosažení co nejlepší shody mezi vypočtenými a měřenými teplotami.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. Design of rotating electrical machines. Second Edition, WILEY, 2014.
- [2] CENGEL Yunus a Afshin GHAJAR. Heat and mass transfer. Fifth edition, McGraw hill education, 2015.
- [3] ANDERSSON, Björn. Lumped Parameter Thermal Modelling of Electric Machines. Master of Science Thesis, Chalmers University of Technology, 2013.

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 29.5.2023

Vedoucí práce: Ing. Marek Toman

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

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá tepelnými výpočty synchronního stroje s přímým připojením na síť. V první části je popsána konstrukce synchronních strojů s přímým připojením na síť. Dále jsou zde uvedeny mechanismy a základní vztahy přenosu tepla, následně je v této práci popsána metoda tepelné sítě. Ve třetí části jsou odvozeny tepelné odpory a jsou připraveny tepelné modely důležitých geometrických těles. Ve čtvrté části se nachází tepelný model synchronního stroje s přímým připojením na síť. Poté je popsána příprava laboratorního vzorku synchronního stroje s přímým připojením na síť. Dále se zde nachází změřené průběhy oteplovacích charakteristik synchronního stroje s přímým připojením na síť. Tyto průběhy jsou porovnány s vypočtenými průběhy přechodného tepelného modelu synchronního stroje s přímým připojením na síť. Na základě průběhů změřených oteplovacích charakteristik byly identifikovány vstupní parametry přechodného tepelného modelu synchronního stroje s přímým připojením na síť. V poslední části práce je uvedeno srovnání středních teplot tepelného modelu se středními teplotami konečnoprvkových tepelných modelů synchronního stroje s přímým připojením na síť vytvořeném v softwaru Ansys Workbench v ustáleném stavu. Dále se zde nachází tvorba částí automatizovaných parametrických geometrií. Následně je vytvořen konečnoprvkový tepelný model synchronního stroje s přímým připojením na síť v softwaru Ansys Workbench v přechodném stavu. Střední teploty tohoto přechodného konečnoprvkového tepelného modelu jsou porovnány se středními teplotami tepelného modelu synchronního stroje s přímým připojením na síť.

KLÍČOVÁ SLOVA

Měření oteplovacích charakteristik synchronních strojů s přímým připojením na síť; metoda tepelné sítě; odvození tepelných odporů; synchronní stroje s přímým připojením na síť; tepelné modely,

ABSTRACT

This paper deals with the thermal calculations of a line-start synchronous machine. The first part presents the design of line-start synchronous machines. Then the mechanisms and fundamental thermal transfer relationships are proposed, followed by the thermal network method. In the third part, thermal resistances are derived, and thermal models of essential geometrical solids are prepared. In the fourth part, the thermal model of the line-start synchronous machine is described. Then the prepared laboratory model of the line-start synchronous machine is proposed. Next, the measured waveforms of thermal characteristics of the line-start synchronous machine are presented. These waveforms are compared with the calculated waveforms of the transient thermal model of the line-start synchronous machine. Based on the waveforms of the measured temperatures, the input parameters of the transient thermal model of the line-start synchronous machine have been identified. In the last part of the paper, the comparison of the average temperatures of the thermal model with the average temperatures of the finite element thermal models of the line-start synchronous machine created in Ansys Workbench software in a steady state is presented. The creation of parts of the automated parametric geometries is included. Subsequently, the transient finite element thermal model of the line-start synchronous machine is created in Ansys Workbench software. The average temperatures of this transient finite element thermal model are further compared with the average temperatures of the thermal model of the line-start synchronous machine.

KEYWORDS

Line-start synchronous machines; thermal network method; derivation of thermal resistances; measurement of thermal characteristics of line-start synchronous machines; thermal models,

SÚKENÍK, Jakub. *Tepelný model synchronního motoru s permanentními magnety s přímým připojením na síť*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2023, 88 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: Ing. Marek Toman

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Bc. Jakub Súkeník
VUT ID autora: 209145
Typ práce: Diplomová práce
Akademický rok: 2022/23
Téma závěrečné práce: Tepelný model synchronního motoru s permanentními magnety s přímým připojením na síť

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

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

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Marku Tomanovi za jeho skvělý profesionální a lidský přístup. Jeho přínos byl pro mne nesmírně cenný a nad rámec běžných povinností vedoucího. Chtěl bych také poděkovat rodičům za jejich vytrvalou a laskavou pomoc v mém studijním úsilí.

Obsah

Seznam obrázků	12
Seznam tabulek	13
Úvod	14
1 Konstrukce synchronních strojů s přímým připojením na síť	16
2 Základní vztahy přenosu tepla	19
2.1 Mechanismy přenosu tepla	19
2.1.1 Přenos tepla vedením	19
2.1.2 Přenos tepla prouděním	20
2.1.3 Přenos tepla zářením	21
2.2 Analogie mezi elektrickými a tepelnými veličinami	22
2.3 Metoda tepelné sítě	23
2.3.1 Sestavení matic na základě tepelné sítě	24
3 Tepelné modely dílčích částí stroje	25
3.1 Výpočet tepelného odporu ve válcové tyči s vývinem tepla	25
3.2 Výpočet tepelného odporu přes válcové mezikruží	26
3.3 Výpočet tepelného odporu přes rovinnou stěnu	28
3.4 Výpočet tepelného odporu hranolu s proměnným průřezem	28
3.5 Výpočet tepelného odporu prouděním	29
3.5.1 Výpočet součinitele přestupu tepla ve vzduchové mezeře	29
3.5.2 Výpočet součinitele přestupu tepla z čel vinutí statoru	30
3.5.3 Výpočet součinitelů přestupu tepla v různých částech stroje	31
3.6 Výpočet stykového odporu	32
3.7 Fyzikální vlastnosti materiálů pro tepelné výpočty	33
3.8 Výpočet ekvivalentní tepelné vodivosti	34
3.8.1 Náhrada kombinace rotorových zubů a tyčí jednotným objemem s ekvivalentní tepelnou vodivostí	35
4 Tepelný model LSPMSM	37
4.1 Rozmístění uzlů tepelného modelu LSPMSM	37
4.2 Tepelná síť LSPMSM	38
4.3 Značení vstupních geometrických rozměrů použitých do výpočtu	41
4.4 Měření LSPMSM	43

4.4.1	Příprava motoru na měření oteplovacích charakteristik	43
4.4.2	Popis laboratorního pracoviště	46
4.4.3	Měření oteplovacích charakteristik LSPMSM	47
4.5	Metody pro identifikaci určených vstupních parametrů tepelného modelu LSPMSM	50
4.5.1	Identifikace vybraných vstupních parametrů pro tepelný model LSPMSM	51
4.6	Srovnání změřených oteplovacích charakteristik LSPMSM s oteplovacími charakteristikami přechodného tepelného modelu LSPMSM . . .	53
5	Srovnání tepelného modelu se simulacemi v softwaru Ansys Workbench	56
5.1	Ověření dílčích částí tepelného modelu simulacemi v softwaru Ansys Workbench	56
5.1.1	Teplotní pole vypočtené pomocí konečnoprvkového tepelného modelu statorového paketu LSPMSM	56
5.1.2	Teplotní pole vypočtené pomocí konečnoprvkového tepelného modelu rotoru LSPMSM	57
5.1.3	Porovnání tepelného modelu LSPMSM s konečnoprvkovými teplotními poli vytvořenými v programu Ansys Workbench . .	59
5.2	Ověření přechodného tepelného modelu LSPMSM simulacemi v programu Ansys Workbench	59
5.2.1	Tvorba geometrického modelu LSPMSM	60
5.2.2	Konečnoprvkové teplotní pole LSPMSM	63
5.3	Porovnání změřených oteplovacích charakteristik LSPMSM se simulacemi v programu Ansys Workbench	65
	Závěr	68
	Literatura	70
	Seznam příloh	80
A	Seznam vstupních proměnných zadávaných do výpočtu	81
A.1	Seznam vstupních geometrických proměnných zadávaných do výpočtu	81
A.2	Seznam materiálů zadávaných do výpočtu	83
B	Výsledky oteplovacích charakteristik v jednotlivých uzlech podle Obr. 4.1	85

B.1 Srovnání oteplovacích charakteristik přechodného tepelného modelu s oteplovacími charakteristikami konečnoprvkového tepelného modelu při jmenovitém zatížení	85
B.2 Srovnání oteplovacích charakteristik přechodného tepelného modelu s oteplovacími charakteristikami konečnoprvkového tepelného modelu při proměnlivém zatížení	87

Seznam obrázků

1.1	Uspořádání LSPMSM	16
1.2	Uspořádání permanentních magnetů rotoru LSPMSM	17
1.3	Typy rotorů LSPMSM	18
2.1	Vedení tepla jednoduchou rovinnou stěnou	19
2.2	Mezní vrstva rychlostní a mezní vrstva teplotní při přechodu tepla mezi tekutinou a pevnou látkou	21
3.1	Tepelný model tyče s vývinem tepla	25
3.2	Tepelný model mezikruží	26
3.3	Tepelný model mezikruží se střední teplotou	27
3.4	Tepelný odpor hranolu	28
3.5	Průběhy součinitelů přestupu tepla z čel vinutí statoru v závislosti na obvodové rychlosti rotoru pro různé stroje	31
3.6	Oblasti s rozdílným druhem prouděním	32
3.7	Nahrazení částí ekvivalentní tepelnou vodivostí	35
3.8	Náhrada kombinace rotorových zubů a rotorových tyčí jednotným objemem s ekvivalentní tepelnou vodivostí	36
4.1	Rozmístění uzlů v LSPMSM	37
4.2	Význam schematických značek	38
4.3	Kompletní tepelná síť LSPMSM	40
4.4	Značení geometrických rozměrů kostry a ložiskového štítu LSPMSM .	41
4.5	Značení geometrických rozměrů statorového paketu LSPMSM	42
4.6	Značení geometrických rozměrů rotoru LSPMSM	42
4.7	Značení geometrických rozměrů statorové a rotorové drážky LSPMSM	43
4.8	Osazení čel LSPMSM teplotními čidly PT1000	44
4.9	Osazení kostry LSPMSM teplotními čidly	44
4.10	Osazení ložiskového štítu LSPMSM teplotním čidlem	45
4.11	Uspořádání pracoviště pro měření LSPMSM	46
4.12	Změřené oteplovací charakteristiky při různých zatěžovacích momentech	49
4.13	Princip funkce metody nejmenších čtverců	50
4.14	Princip funkce metody využívající roj částic	51
4.15	Porovnání změřených oteplovacích charakteristik LSPMSM s otep- lovacími charakteristikami přechodného tepelného modelu řešeného pomocí LSM	54
4.16	Porovnání změřených oteplovacích charakteristik LSPMSM s otep- lovacími charakteristikami přechodného tepelného modelu řešeného pomocí PSO	55

5.1	Teplotní pole vypočtené pomocí konečnoprvkového tepelného modelu statorového paketu LSPMSM v ustáleném stavu	57
5.2	Teplotní pole vypočtené pomocí konečnoprvkového tepelného modelu rotoru LSPMSM v ustáleném stavu	58
5.3	Algoritmus pro tvorbu parametrické geometrie	60
5.4	Typy rotorových drážek	61
5.5	Typy statorových drážek	61
5.6	Geometrické modely rotoru a statoru LSPMSM	62
5.7	Geometrický model LSPMSM	62
5.8	Algoritmus pro tvorbu a výpočet konečnoprvkového teplotního pole LSPMSM	63
5.9	Vypočtené teplotní pole LSPMSM v určitém časovém okamžiku při jmenovitém zatížení	64
5.10	Srovnání oteplovacích charakteristik důležitých částí stroje přechodného tepelného modelu LSPMSM s konečnoprvkovým tepelným modelem LSPMSM a s měřením při jmenovitém zatížení	66
5.11	Srovnání oteplovacích charakteristik důležitých částí stroje přechodného tepelného modelu LSPMSM s konečnoprvkovým tepelným modelem LSPMSM a s měřením	67

Seznam tabulek

2.1	Analogie mezi elektrickými a tepelnými veličinami	23
3.1	Konstanty součinitelů přestupu tepla čel statoru od různých autorů .	30
3.2	Vztahy pro výpočet součinitele přestupu tepla v různých částech stroje	32
3.3	Fyzikální vlastnosti používaných materiálů v elektrických strojích . .	33
3.4	Měrné tepelné vodivosti některých izolačních materiálů	34
4.1	Význam jednotlivých uzlů rozmístěných na Obr. 4.1	38
4.3	Počáteční identifikované vybrané vstupní parametry pro tepelný model LSPMSM včetně ohraničení a výsledků identifikovaných vybraných parametrů	52
5.1	Okrajové podmínky pro konečnoprvkový tepelný model statorového paketu LSPMSM použité pro ověření funkčnosti tepelného modelu LSPMSM při ustáleném stavu	57
5.2	Okrajové podmínky pro konečnoprvkový tepelný model rotoru použité pro ověření funkčnosti tepelného modelu LSPMSM v ustáleném stavu	58
5.3	Porovnání tepelného modelu LSPMSM s konečnoprvkovými teplotními poli vytvořenými v programu Ansys Workbench	59
A.1	Vstupní rozměry LSPMSM zadané do výpočtu	81
A.2	Tepelné vodivosti a ekvivalentní tepelné vodivosti LSPMSM	83
A.3	Objemové hustoty LSPMSM	83
A.4	Měrné tepelné kapacity LSPMSM při konstantním tlaku	84

Úvod

Významný podíl na spotřebě elektrické energie mají elektromotory pro průmyslové a domácí aplikace [1, 2, 3]. Kromě elektrické energie spotřebovávané elektromotory používanými ve všech oborech jsou dalším významným problémem suroviny používané pro výrobu motorů. Vzhledem k rostoucím cenám elektrické energie, materiálu a ekologickému povědomí roste zájem o vysoce energeticky účinné točivé stroje [3].

Díky těmto požadavkům byly zavedeny kategorie účinnosti elektrických strojů, kde například americké standardy Národní asociace výrobců elektrických zařízení (NEMA) klasifikují účinnosti elektrických strojů do čtyř kategorií jako standardní účinnost, vysoká účinnost, prémiová účinnost a super prémiová účinnost [4, 5, 6]. Obdobu těchto standardů pro Evropu jsou standardy, které jsou vydávány Mezinárodní elektrotechnickou komisí (IEC). Zde je uvedeno pět kategorií, a to IE1, IE2, IE3, IE4 a IE5 [5, 6, 7]. V současnosti se výrobci snaží dosáhnout účinnosti svých motorů na poslední dvě kategorie, tedy IE4 a IE5 [5, 6, 7].

Synchronní motory s permanentními magnety, zkratkou PMSMs (permanent magnet synchronous motors), mají vysokou účinnost a hustotu výkonu vzhledem ke hmotnosti. Jedním z hlavních problémů je ten, že tyto motory nemohou být spouštěny přímo z elektrické sítě. Rozběh PMSM je třeba zprostředkovat pomocí měniče, který bývá drahý, náchylný na poruchy a náročný na spotřebu elektrické energie. Tato problematika platí obzvláště v některých aplikacích, jako jsou čerpadla, ventilátory a dopravníky, kde není třeba regulovat otáčky a je kladen důraz na provozní náklady a cenu [3].

V roce 1971 byl navržen nový typ synchronního stroje, který využíval jak permanentní magnety, tak rotorovou litou klec nakrátko. Klec nakrátko vytváří při rozběhu záběrný moment, což umožňuje aby byl stroj spuštěn přímo ze střídavého napájení bez změny frekvence, například elektrické sítě. Tento typ stroje je nyní znám jako synchronní stroj s permanentními magnety spouštěný ze sítě (LSPMSM) [8].

Díky permanentním magnetům v rotoru se při ustáleném stavu LSPMSMs samy synchronizují a po dosažení synchronních otáček dále pracují synchronně i pod zatížením, zatímco asynchronní motory (ASM) operují s proměnnými otáčkami v závislosti na zatížení [3].

V rotorové kleci LSPMSMs se při ustáleném stavu neindukuje žádný proud, protože klec nakrátko neprotíná statorové magnetické pole díky účinku magnetického toku generovaného permanentními magnety, což vede ke snížení elektromagnetických ztrát v motoru tohoto typu [3]. Tato skutečnost je velice výhodná z pohledu chlazení LSPMSMs. Jouleovy ztráty v rotoru elektrického stroje je náročné účinně odvádět, díky jejich absenci v LSPMSMs není třeba odvádět Jouleovy ztráty dodatečným chlazením nebo modifikací rotoru či hřídele, což je výhodné z ekonomického pohledu.

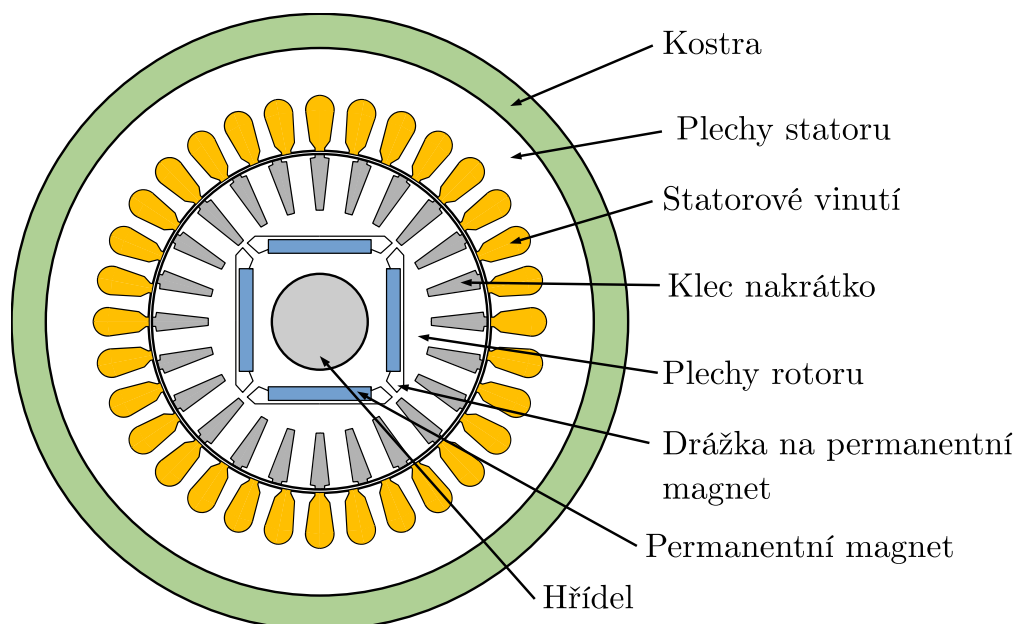
Přehled různých chlazení rotorů elektrických strojů je možné dohledat např. v [9].

ASM, které jsou preferovány pro svou robustnost a požadavek na menší údržbu, jsou uváděny na trh s účinností IE3 a nižší. Tyto motory s účinností vyšší než IE3 není možné vyrábět kvůli technologickým, materiálovým a cenovým omezením. Kromě toho, že jsou stejně jako ASM robustní a vyžadují méně údržby, jsou LSPM-SMs díky permanentním magnetům v rotoru schopny poskytovat účinnost vyšší než ASM [3].

1 Konstrukce synchronních strojů s přímým připojením na síť

Konstrukce LSPMSM, celým názvem Line start permanent magnet synchronous motor, v překladu synchronní stroj s permanentními magnety s přímým připojením na síť se od ASM liší v podstatě jen uspořádáním rotoru stroje. Stator LSPMSM je totožný se státorem ASM. V drážkách statoru jsou uloženy cívky podle daného způsobu navíjení a tyto cívky jsou následně propojeny do podoby třífázového vinutí. Stator je kvůli omezení ztrát laminován, tedy sestaven z tenkých izolovaných plechů. Okolo statoru se nachází kostra. Tato kostra je obvykle shodná s kostrou ASM.

Rotor LSPMSM je rozdílný od ASM pouze tím, že má kromě drážek na klec nakrátko také další drážky na umístění permanentních magnetů. Stejně jako rotor ASM je rotor LSPMSM laminovaný. Příklad uspořádání LSPMSM je zobrazen na Obr. 1.1.

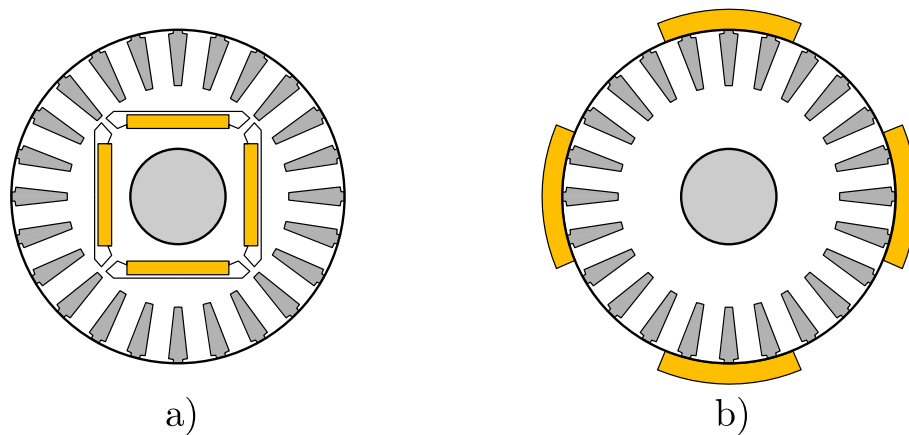


Obr. 1.1: Uspořádání LSPMSM, upraveno z [10].

Použití nebo případné nahrazení stávajících ASM novými LSPMSM může znamenat citelné výhody. Je možné navrhnout LSPMSM s podobnými vlastnostmi a pokud to návrh umožňuje, použít stávající komponenty a vyrobit LSPMSM pomocí nich, což může razantně snížit výrobní náklady. Díky permanentním magnetům v rotoru LSPMSM se generuje oproti rotoru ASM méně ztrát, to má za následek menší spotřebu elektrické energie při chodu. Podle [11] je možné zvýšit celkovou účinnost LSPMSM o 3 až 5 % oproti ASM. Další výhoda LSPMSM se týká velikosti stroje,

protože stator LSPMSM je možné díky permanentním magnetům v rotoru koncipovat na větší výkon stroje, než kdyby se použil stejný stator na ASM. Nevýhoda LSPMSM je použití permanentních magnetů, které jsou z hlediska ceny jedna z nejdražších položek v celém stroji. Při použití permanentních magnetů v rotoru je třeba dbát na dobré chlazení stroje, protože tyto magnety jsou tvořeny kovy ze vzácných zemin, jako jsou neodym železo bór (NdFeB) nebo samarium kobalt (SmCo), které trpí na demagnetizaci vlivem vyšších teplot. Také parametry permanentních magnetů se vlivem rozdílných teplot mění a to ovlivňuje celé chování stroje [10].

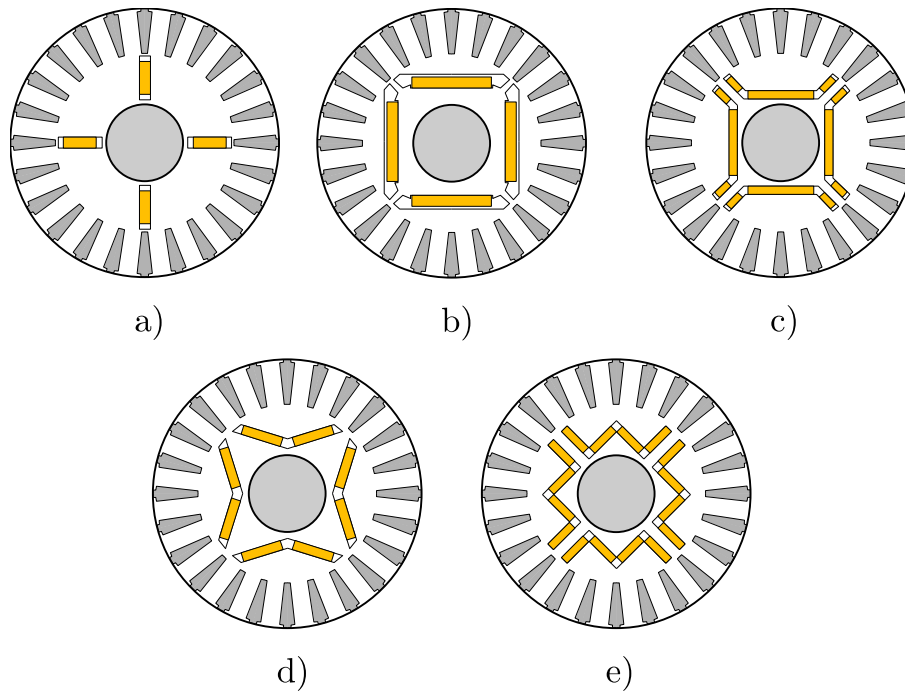
Z pohledu uspořádání permanentních magnetů na rotoru je možné rozdělit rotor LSPMSM na motor s vnitřním a vnějším uspořádáním permanentních magnetů. Tato uspořádání jsou zobrazena na Obr. 1.2 [10].



Obr. 1.2: Uspořádání permanentních magnetů rotoru LSPMSM, a) rotor s vnitřním uspořádáním permanentních magnetů, b) rotor s vnějším uspořádáním permanentních magnetů, upraveno z [10].

LSPMSM s vnitřním uspořádáním má robustní konstrukci a díky kleci nakrátko je obtížnější permanentní magnety vnořené pod rotorovou klecí demagnetizovat. Výhoda LSPMSM s vnějším uspořádáním permanentních magnetů spočívá v jednodušší výrobě než s vnitřním uspořádáním. Kromě této výhody se permanentní magnety nachází blíže statorovému vinutí. Kvůli tomu může tento typ rotoru poskytovat větší točivý moment. Díky menšímu rozptylovému magnetickému toku a díky reluktanci je tento typ uspořádání schopen nabídnout větší hustotu magnetického toku ve vzduchové mezeře a tím také vyšší hustotu výkonu. Na druhou stranu větší hustota toku ve vzduchové mezeře způsobuje díky samovolnému přitahování permanentních magnetů k zubům statoru vibrace a také zvyšuje hlučnost motoru při chodu [10].

Na Obr. 1.3 jsou uvedeny různé typy rotorů LSPMSM s vnitřním uspořádáním permanentních magnetů, za a) paprskové uspořádání, neboli radiální magnetický



Obr. 1.3: Typy rotorů LSPMSM, upraveno z [10].

obvod, b) sériový magnetický obvod, c) magnetický obvod typu U, d) magnetický obvod typu V a e) magnetický obvod typu W. Různá uspořádání mohou mít vliv na výkon, účinnost, účinník a také na rozběhový moment stroje. Při návrhu stroje je nutné brát v potaz jak geometrické rozměry drážek pro klec nakrátko, geometrické rozměry drážek na magnet, rozměry permanentních magnetů, tak i otáčky či výkon samotného stroje [10].

2 Základní vztahy přenosu tepla

2.1 Mechanismy přenosu tepla

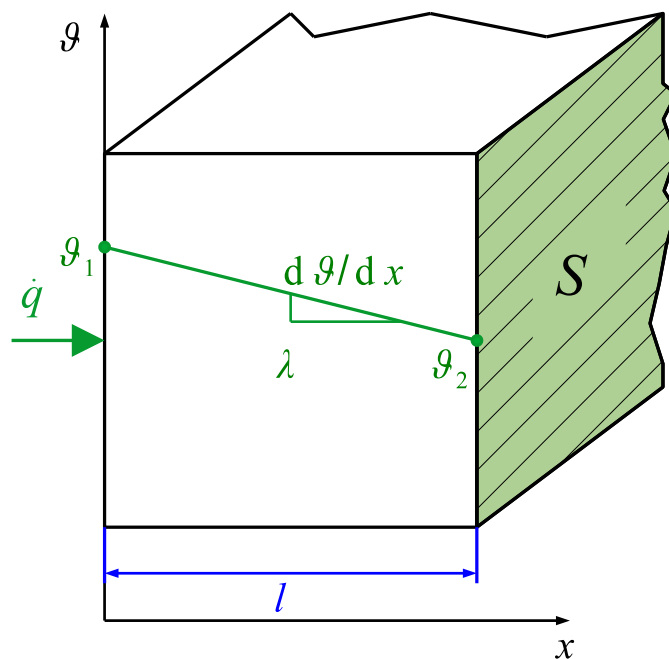
Teplo se šíří třemi způsoby, a to vedením neboli kondukcí, dále prouděním, tedy konvekcí a sáláním, neboli radiací. Rozdíly teplot se vyrovnávají přirozeným přenosem tepla z místa s vyšší teplotou do místa s nižší teplotou podle druhého zákona termodynamiky. Tyto druhy přenosu tepla se v mnoha případech vyskytují současně [12].

2.1.1 Přenos tepla vedením

V pevných látkách se v největší míře uplatňuje přenos tepla vedením, tedy kondukcí. Přenos energie je zprostředkován částicemi ve vnitřní struktuře látky. Tyto částice jsou v neustálém pohybu [12]. Základním vztahem pro sdílení tepla vedením je podle [12, 13] Fourierův zákon, ten je ve tvaru

$$\dot{\mathbf{q}} = -\lambda \nabla \vartheta, \quad (2.1)$$

kde $\dot{\mathbf{q}}$ je vektor hustoty tepelného toku, λ je měrná tepelná vodivost, $\nabla \vartheta$ je gradient teploty. Záporné znaménko v rovnici (2.1) vyjadřuje směr tepelného toku ve směru klesající teploty [12]. Přenos tepla přes rovinnou stěnu je zobrazen na Obr. 2.1. Pokud se uvažuje jednorozměrné vedení tepla, je možné rovnici (2.1) upravit



Obr. 2.1: Vedení tepla jednoduchou rovinnou stěnou, upraveno z [12].

$$\dot{q} = -\lambda \frac{d\vartheta}{dx}, \quad (2.2)$$

kde \dot{q} představuje hustotu tepelného toku, $\frac{d\vartheta}{dx}$ je derivace teploty. Pomocí rovnice (2.2) lze vztah pro hustotu tepelného toku v rovinné stěně o jednotkové ploše z předchozího příkladu psát podle [12] ve tvaru

$$\dot{q} = \frac{\lambda}{l}(\vartheta_1 - \vartheta_2), \quad (2.3)$$

kde ϑ_1 a ϑ_2 jsou teploty jednotlivých ploch, l je tloušťka tělesa a λ představuje měrnou tepelnou vodivost materiálu stěny.

Jednotlivé teploty ϑ_1 a ϑ_2 lze nahradit jedním symbolem $\Delta\vartheta$, který představuje rozdíl teplot. Potom můžeme psát

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = \Delta\vartheta. \quad (2.4)$$

Pro celkový tepelný tok \dot{Q} stěny platí vztah

$$\dot{Q} = \frac{\lambda S}{l} \Delta\vartheta, \quad (2.5)$$

kde S představuje plochu stěny.

2.1.2 Přenos tepla prouděním

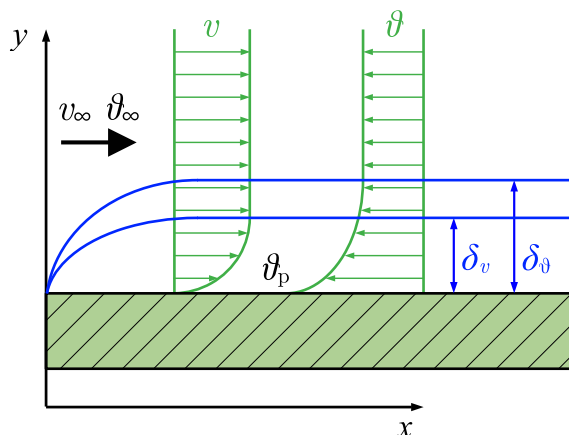
Přenos tepla prouděním, jinak řečeno konvekcí, je zprostředkován makroskopickým pohybem kapaliny nebo plynu, tedy tekutiny. Proudění, které vzniká v tekutině samovolně se nazývá volné proudění. Volné proudění vzniká díky rozdílu hustot v tekutině a díky tomu se začíná tekutina uvádět do pohybu. Proudění tekutiny vyvolané vnější silou, například čerpadlem nebo ventilátorem, se nazývá proudění nucené [13].

Sdílení tepla prouděním se uplatňuje také při přechodu tepla z pevného tělesa do tekutiny, nebo také naopak. Proudění tepla z pevného tělesa do tekutiny zobrazuje Obr. 2.2. V těsné blízkosti povrchu pevného tělesa vzniká mezní vrstva, tedy tenká vrstva tekutiny. Na Obr. 2.2 je znázorněn průběh teplotní mezní vrstvy δ_ϑ a rychlostní mezní vrstvy δ_v . Tloušťka těchto vrstev závisí na mnoha parametrech [13].

Množství tepelného toku \dot{q} , to je tepelná energie, která projde za jednotku času jednotkovou plochou z tekutiny do tělesa vyjadřuje Newtonův ochlazovací zákon. Podle [12] je tato rovnice ve tvaru

$$\dot{q} = \alpha(\vartheta_p - \vartheta_\infty), \quad (2.6)$$

kde $\Delta\vartheta$ je rozdíl teplot na povrchu tělesa ϑ_p a teploty dané tekutiny ϑ_∞ v dostatečné vzdálenosti od daného povrchu¹.



Obr. 2.2: Mezní vrstva rychlostní a mezní vrstva teplotní při přechodu tepla mezi tekutinou a pevnou látkou, upraveno z [13].

Pokud je rovnice (2.6) vztažena k určité teplosměnné ploše S , kterou tepelný tok \dot{Q} prochází, potom má tvar

$$\dot{Q} = \alpha S(\vartheta_p - \vartheta_\infty) = \alpha S \Delta\vartheta. \quad (2.7)$$

Při uvažování kladného tepelného toku je teplota povrchu na Obr. 2.2 vyšší, než teplota v okolní tekutině. Protože je hodnota tepelného toku kladná, tepelný tok je odváděn prouděním z tělesa do tekutiny. Proměnná α se nazývá součinitel přestupu tepla a udává množství energie průchozího přes jednotkovou plochu do tekutiny nebo z ní za jednotku času při teplotním rozdílu jeden Kelvin mezi tekutinou a povrchem tělesa [13]. Tento součinitel je definován

$$\alpha = \frac{\text{Nu}\lambda}{l}, \quad (2.8)$$

kde l je charakteristická délka, λ představuje tepelnou vodivost a Nu je Nusseltovo číslo, které popisuje, kolikrát je účinnější přenos tepla konvekcí oproti přenosu tepla kondukcí v dané tekutině, tedy kapalině nebo plynu [13].

2.1.3 Přenos tepla zářením

Přenos tepla sáláním, neboli radiací je uskutečňován pomocí elektromagnetického záření. Každé těleso, které má vyšší teplotu než absolutní nula, vyzařuje do okolí toto záření [12].

¹Někdy se ϑ_∞ označuje jako teplota volného proudění

Jako jediný mechanismus přenosu tepla nepotřebuje pro šíření prostředí s částicemi, tedy přenos tepla sáláním se může uskutečňovat i ve vakuu. Další vlastností je vysoká rychlost přenosu tepla, ve vakuu dosahuje až rychlosti světla [12].

Tepelný tok sáláním \dot{Q}_s pro dokonale černé těleso je ve tvaru

$$\dot{Q}_s = \sigma S T_p^4, \quad (2.9)$$

kde σ je Stefan-Boltzmannova konstanta a T_p je termodynamická teplota povrchu tělesa, která se dá vyjádřit ve tvaru

$$T_p = (\vartheta_p + 273,15), \quad (2.10)$$

kde ϑ_p je teplota povrchu tělesa ve stupních Celsia. Hodnota Stefan-Boltzmannovy konstanty je rovna $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

Absolutně černé těleso je model, který dokonale pohlcuje veškeré elektromagnetické záření. Současně je také ideální zářič. Pro reálná tělesa je podle [12] tepelný tok sáláním \dot{Q} popsán vztahem

$$\dot{Q}_s = \varepsilon \sigma S T_p^4, \quad (2.11)$$

kde ε reprezentuje emisivitu povrchu. Absolutně černé těleso nabývá hodnoty rovné jedné, pro reálná tělesa nabývá emisivita ε hodnot menších než jedna [12].

2.2 Analogie mezi elektrickými a tepelnými veličinami

Určitou analogii je možné zavést mezi elektrickými a tepelnými veličinami. Tyto analogie se nachází v Tab. 2.1. K tepelnému toku je analogie z elektrických veličin elektrický proud. Teplota odpovídá elektrickému potenciálu a například rozdíl teplot odpovídá rozdílu elektrických potenciálů, tedy elektrickému napětí.

Z Tab. 2.1 plyne, že v tepelných obvodech platí Ohmův zákon ve tvaru

$$\dot{Q} = \frac{\Delta\vartheta}{R}. \quad (2.12)$$

Tepelnou vodivost je možné vyjádřit z rovnice (2.12) jako převrácenou hodnotu tepelného odporu.

$$G = \frac{1}{R}. \quad (2.13)$$

Podobnou analogii je možné zavést i pro kapacitu. Elektrická kapacita C_e je ekvivalentní k tepelné kapacitě C . Elektrický náboj Q_e , na který je kondenzátor nabit, je možné vyjádřit ve tvaru

$$Q_e = C_e \cdot U, \quad (2.14)$$

Tab. 2.1: Analogie mezi elektrickými a tepelnými veličinami [13, 14].

Tepelná veličina	Symbol	Jednotka	El. veličina	Symbol	Jednotka
Tepelná energie	Q	J	El. náboj	Q_e	C
Tepelný tok	\dot{Q}	W	El. proud	I	A
Hustota tep. toku	\dot{q}	$\frac{W}{m^2}$	Proud. hustota	J	$\frac{A}{m^2}$
Teplota	ϑ	$^{\circ}C$	El. potenciál	φ	V
Oteplení	$\Delta\vartheta$	$^{\circ}C$	El. napětí	U	V
Součinitel tep. vod.	λ	$\frac{W}{m \cdot K}$	El. měrná vod.	σ_e	$\frac{S}{m}$
Tepelný odpor	R	$\frac{K}{W}$	El. odpor	R_e	Ω
Tepelná vodivost	G	$\frac{W}{K}$	El. vodivost	G_e	S
Tepelná kapacita	C	$\frac{J}{K}$	El. kapacita	C_e	F

kde U je elektrické napětí. Množství tepelné energie Q , kterou obsahuje těleso, je možné psát ve tvaru

$$Q = \rho \cdot V \cdot c \cdot \Delta\vartheta, \quad (2.15)$$

kde ρ je objemová hustota, V je objem, c je měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku a $\Delta\vartheta$ je oteplení způsobené tepelnou energií Q . Porovnáním rovnice (2.14) s rovnicí (2.15) je možné zjistit, že tepelná kapacita C je rovna

$$C = \rho \cdot V \cdot c. \quad (2.16)$$

2.3 Metoda tepelné sítě

Tepelný výpočet stroje je možné realizovat metodou tepelné sítě neboli metodou ekvivalentních tepelných obvodů. Účel této metody je vytvořit tepelné schéma, které bude svým chováním simulovat tepelné chování analyzovaného stroje. Toto schéma se skládá z dílčích prvků, jako jsou uzly, větve a nory [15].

- **Uzel** - tento prvek je charakterizován svou teplotou a také může či nemusí být zdrojem tepelného toku.
- **Větev** - zprostředkovává cestu mezi dvěma nebo více uzly, větev je buď tepelným odporem nebo vodivostí.
- **Nor** - je prvek, který umožňuje odvod tepla do okolního prostředí.

Tato metoda se převážně používá pro ustálené stavy. Nicméně je možné ji použít i pro přechodné, tedy tranzientní stavy, ale v tom případě musí být doplněna tepelnými kapacitami [15].

2.3.1 Sestavení matic na základě tepelné sítě

Výpočet neznámých uzlových teplot je možné řešit jako soustavu lineárních rovnic. Tyto rovnice jsou podle [16, 17] uspořádány do matic ve tvaru

$$\begin{pmatrix} G_1 & -g_{12} & -g_{13} & \dots & -g_{1n} \\ -g_{21} & G_2 & -g_{23} & \dots & -g_{2n} \\ -g_{31} & -g_{32} & G_3 & \dots & -g_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -g_{n1} & -g_{n2} & -g_{n3} & \dots & G_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \vartheta_3 \\ \vdots \\ \vartheta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{Q}_1 + g_{n,1}\vartheta_{o,1} \\ \dot{Q}_2 + g_{n,2}\vartheta_{o,2} \\ \dot{Q}_3 + g_{n,3}\vartheta_{o,3} \\ \vdots \\ \dot{Q}_n + g_{n,n}\vartheta_{o,n} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} C_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & C_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & C_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{\vartheta}_1 \\ \dot{\vartheta}_2 \\ \dot{\vartheta}_3 \\ \vdots \\ \dot{\vartheta}_n \end{pmatrix}. \quad (2.17)$$

Prvky g_{kl} v rovnici (2.17) představují tepelné vodivosti spojující k -tý a l -tý uzel. Podle [16, 17] jsou tepelné vodivosti dány odporem této větve

$$g_{kl} = \frac{1}{R_{kl}} \quad (2.18)$$

a zároveň se rovná

$$g_{kl} = g_{lk}. \quad (2.19)$$

Rovnici (2.17) lze vyjádřit ve zkráceném tvaru

$$\mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\vartheta} = \dot{\mathbf{Q}} - \mathbf{C} \cdot \dot{\boldsymbol{\vartheta}}, \quad (2.20)$$

kde \mathbf{G} představuje matici tepelných vodivostí, $\boldsymbol{\vartheta}$ je matice neznámých teplot, $\dot{\mathbf{Q}}$ je matice tepelných toků, které mohou obsahovat vnitřní generované ztráty \dot{Q}_n a odvod tepla do okolí, \mathbf{C} je matice tepelných kapacit a $\dot{\boldsymbol{\vartheta}}$ je matice časových derivací teplot. Abychom získali řešení, je třeba vyjádřit nejvyšší derivaci $\dot{\boldsymbol{\vartheta}}$ z rovnice (2.17) podle [16, 17] ve tvaru

$$\dot{\boldsymbol{\vartheta}} = \mathbf{C}^{-1} \cdot (\dot{\mathbf{Q}} - \mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\vartheta}), \quad (2.21)$$

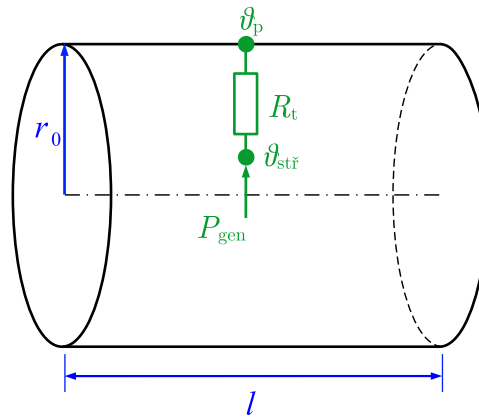
kde \mathbf{C}^{-1} je inverzní matice tepelných kapacit. Pro sestavení lineárních rovnic v maticovém tvaru je zapotřebí z geometrických rozměrů daného stroje určit tepelné odpory příslušných částí stroje [16, 17]. Této problematice se blíže zabývá následující kapitola.

3 Tepelné modely dílčích částí stroje

V této kapitole jsou uvedeny tepelné odpory různých geometrických těles a dále jsou z těchto tepelných odporů sestaveny tepelné modely, ze kterých se LSPMSM skládá.

3.1 Výpočet tepelného odporu ve válcové tyči s vývinem tepla

Na Obr. 3.1 je zobrazen tepelný model tyče o měrné tepelné vodivosti λ , délce l a poloměru r_0 . V této tyči vznikají měrné objemové ztráty p_{gen} .



Obr. 3.1: Tepelný model tyče s vývinem tepla, upraveno z [18].

Vztah mezi celkovými ztrátami a ztrátami objemovými v této tyči je popsán rovnicí

$$P_{\text{gen}} = p_{\text{gen}} \pi r_0^2 l, \quad (3.1)$$

kde P_{gen} jsou celkové generované ztráty v tyči. Pro odvození tepelného odporu v tyči je třeba vycházet z rovnice teplotního průběhu, která je podle [12] ve tvaru

$$\vartheta = \vartheta_p + \frac{p_{\text{gen}}}{4\lambda} (r_0^2 - r^2), \quad (3.2)$$

kde ϑ_p je teplota na povrchu, ϑ je teplota závislá na poloměru tyče r , r_0 je vnější poloměr tyče a λ je měrná tepelná vodivost tohoto tělesa. Dosazením rovnice (3.1) do rovnice (3.2) je možné získat

$$\vartheta = \vartheta_p + \frac{P_{\text{gen}}}{4\pi\lambda l r_0^2} (r_0^2 - r^2). \quad (3.3)$$

Při uvažování $r = 0$ je možné rovnici (3.3) přepsat do tvaru

$$\vartheta = \vartheta_{\text{max}} = \vartheta_p + \frac{P_{\text{gen}}}{4\pi\lambda l}, \quad (3.4)$$

kde ϑ_{\max} je maximální teplota uprostřed tyče. Při určení střední teploty je potřeba zohlednit hodnotu teploty vzhledem k poloměru

$$\vartheta_{\text{stř}} = \frac{1}{\pi r_0^2} \int_0^{r_0} \vartheta(r) 2\pi r dr = \frac{2}{r_0^2} \int_0^{r_0} \vartheta(r) r dr, \quad (3.5)$$

kde $\vartheta_{\text{stř}}$ je střední teplota v tyči. Dosazením rovnice (3.5) do rovnice (3.3) se získá

$$\vartheta_{\text{stř}} = \vartheta_p + \frac{P_{\text{gen}}}{8\pi\lambda l}. \quad (3.6)$$

Pro střední teplotu tyče $\vartheta_{\text{stř}}$ je možné z Obr. 3.1 odvodit vztah

$$\vartheta_{\text{stř}} = \vartheta_p + P_{\text{gen}} R_t. \quad (3.7)$$

Výsledná rovnice pro výpočet vnitřního odporu vedením uvnitř tyče se určí porovnáním rovnic (3.6) a (3.7),

$$R_t = \frac{1}{8\pi l \lambda}. \quad (3.8)$$

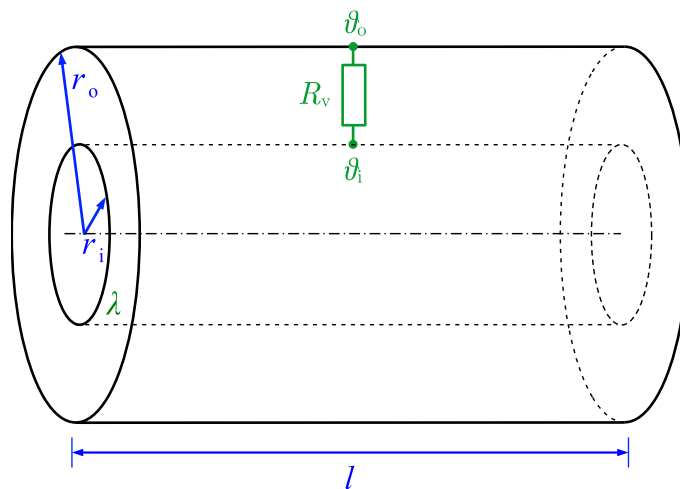
Odvození dalších tepelných odporů různých geometrických těles je provedeno obdobně.

3.2 Výpočet tepelného odporu přes válcové mezikruží

Pro celkový tepelný tok válcovým mezikružím \dot{Q} platí podle [12] vztah

$$\dot{Q} = \frac{2\pi\lambda l}{\ln \frac{r_o}{r_i}} \Delta\vartheta = \frac{2\pi\lambda l}{\ln \frac{d_o}{d_i}} \Delta\vartheta, \quad (3.9)$$

kde r_i je vnitřní poloměr válcového mezikruží, r_o je vnější poloměr válcového mezikruží, respektive d_i , d_o jsou vnitřní a vnější průměry mezikruží, l je délka mezikruží a $\Delta\vartheta$ je rozdíl teplot. Na Obr. 3.2 je uveden tepelný model mezikruží.



Obr. 3.2: Tepelný model mezikruží, upraveno z [12].

Dosažením rovnice (3.14) do rovnice (3.9) je vyjádřen výsledný tepelný odpor mezikružím R_v ve tvaru

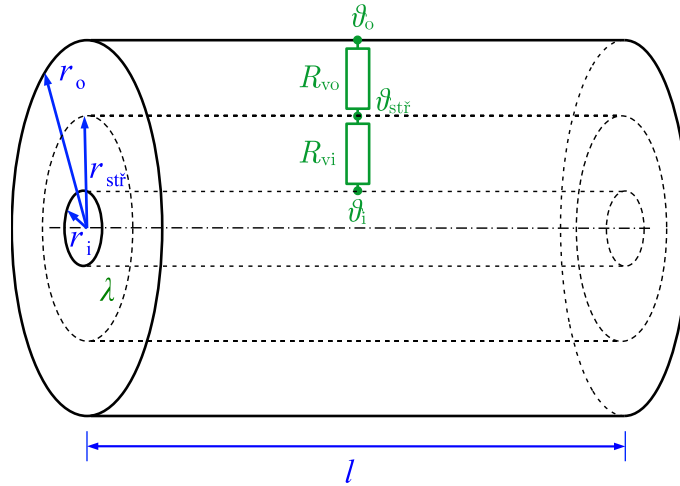
$$R_v = \frac{\ln \frac{r_o}{r_i}}{2\pi l \lambda}. \quad (3.10)$$

Obdoba rovnice (3.10) platí pro tepelný odpor zubů elektrického stroje $R_{v,z}$ podle [19] ve tvaru

$$R_{v,z} = \frac{\ln \frac{r_o}{r_i}}{2\pi l \lambda p_v}, \quad (3.11)$$

kde koeficient p_v reprezentuje poměr mezi objemem zubů a celkovým objemem, tedy objemem drážek a objemem zubů. Pokud je tento koeficient roven jedné, je rovnice (3.11) shodná s rovnicí (3.10) a reprezentuje tepelný odpor mezikružím a pokud je koeficient roven méně než jedné, odpovídá rovnice (3.11) výpočtu tepelného odporu zubů [19].

Na Obr. 3.3 se nachází zjednodušený tepelný model válcového mezikružím, který poskytuje přibližnou, ale zároveň dostatečně přesnou střední teplotu tělesa. Tento model zohledňuje tepelné chování válcového mezikružím v radiálním směru.



Obr. 3.3: Tepelný model mezikružím se střední teplotou, upraveno z [20].

Aby bylo možné určit střední teplotu válcového mezikružím $\vartheta_{stř}$, je zapotřebí určit střední poloměr mezikružím $r_{stř}$. Tepelný odpor mezikružím mezi vnějším poloměrem r_o a středním poloměrem $r_{stř}$ je podle [20] roven

$$R_{vo} = \frac{\ln \frac{r_o}{r_{stř}}}{2\pi l \lambda} \quad (3.12)$$

a tepelný odpor mezi středním poloměrem $r_{stř}$ a vnitřním poloměrem r_i je podle [20] ve tvaru

$$R_{vi} = \frac{\ln \frac{r_{stř}}{r_i}}{2\pi l \lambda}. \quad (3.13)$$

3.3 Výpočet tepelného odporu přes rovinnou stěnu

Tepelný odpor přes rovinnou stěnu podle Obr. 2.1 vychází ze [12] ve tvaru

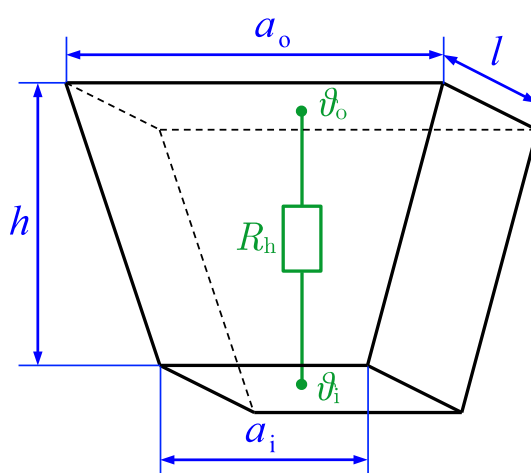
$$R = \frac{\Delta\vartheta}{\dot{Q}}. \quad (3.14)$$

Dosazením rovnice (2.5) z kapitoly 2.1.1 do rovnice (3.14) je vyjádřen tepelný odpor stěny ve tvaru

$$R_s = \frac{l}{\lambda S}. \quad (3.15)$$

3.4 Výpočet tepelného odporu hranolu s proměnným průřezem

Hranol s proměnným průřezem je zobrazen na Obr. 3.4.



Obr. 3.4: Tepelný odpor hranolu, upraveno z [21].

Tepelný odpor hranolu s proměnným průřezem je podle [21] popsán ve tvaru

$$R_h = h \frac{\ln\left(\frac{a_o}{a_i}\right)}{l\lambda(a_o - a_i)}, \quad (3.16)$$

kde l je daná tloušťka, λ je měrná tepelná vodivost, h reprezentuje výšku, a_o je šířka horní části a a_i je šířka spodní části.

3.5 Výpočet tepelného odporu prouděním

Pro určení výsledného odporu prouděním R_p se dosadí rovnice (2.7) do vztahu (3.14) a dostaneme podle [13, 22] vztah ve tvaru

$$R_p = \frac{1}{\alpha \cdot S}, \quad (3.17)$$

kde α vyjadřuje součinitel přestupu tepla a S představuje plochu povrchu tělesa.

3.5.1 Výpočet součinitele přestupu tepla ve vzduchové mezeře

Pro určení odporu v rovnici (3.17) je důležité kromě plochy povrchu dané části stroje S , jejíž určení je relativně jednoduché, vypočítat součinitel přestupu tepla α . Pro výpočet součinitele přestupu tepla ve vzduchové mezeře α_{Del} se nejdříve určí podle [13] Taylorovo číslo Ta , které vyjadřuje poměr mezi viskózními silami a odstředivými silami,

$$Ta = \frac{\rho^2 \omega^2 r_{stř} \delta^3}{\mu^2}, \quad (3.18)$$

kde ρ představuje hustotu dané tekutiny, tedy kapaliny nebo plynu, ω je úhlová rychlost rotoru, μ představuje dynamickou viskozitu tekutiny a $r_{stř}$ je střední hodnota poloměru vzduchové mezery, pro kterou platí

$$r_{stř} = \frac{r_{si} + r_{rt}}{2}, \quad (3.19)$$

kde r_{si} je vnitřní poloměr statoru a r_{rt} představuje vnější poloměr rotoru. Geometrický faktor F_g se určí podle vztahu

$$F_g = \frac{\pi^4 \left[\frac{2r_{stř} - 2,304\delta}{2r_{stř} - \delta} \right]}{1697 \left[\frac{2r_{stř} - 2,304\delta}{2r_{stř} - \delta} \right]^2 \left[1 - \frac{\delta}{2r_{stř}} \right]}. \quad (3.20)$$

Modifikované Taylorovo číslo Ta_m zohledňuje vliv geometrického faktoru F_g , toto číslo se vypočte podle [13] jako

$$Ta_m = \frac{Ta}{F_g}. \quad (3.21)$$

Většinou je šířka vzduchové mezery δ násobně rozměrově menší než vnější poloměr rotoru r_{rt} , díky tomu je geometrický faktor roven téměř jedné a můžeme psát

$$Ta_m \approx Ta. \quad (3.22)$$

Nusseltovo číslo Nu se určí z [13] podle vztahu ve tvaru

$$\begin{aligned} Nu &= 2 && \text{pro } Ta_m \leq 1700 \text{ laminární,} \\ Nu &= 0,128 Ta_m^{0,367} && \text{pro } 1700 < Ta_m < 10^4, \\ Nu &= 0,409 Ta_m^{0,241} && \text{pro } 10^4 < Ta_m < 10^7 \text{ turbulentní.} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Výsledný tvar pro výpočet součinitele přestupu tepla ve vzduchové mezeře je podle [13, 18] roven

$$\alpha_{\text{Del}} = \frac{\text{Nu}\lambda}{\delta}, \quad (3.24)$$

kde λ vyjadřuje měrnou tepelnou vodivost tekutiny ve vzduchové mezeře.

3.5.2 Výpočet součinitele přestupu tepla z čel vinutí statoru

Přibližné vztahy pro výpočet součinitele přestupu tepla z čel vinutí statoru lze nalézt v [13, 23, 24, 25]. Tyto vztahy je možné upravit pomocí měření. Podle [12, 23] je součinitel přestupu tepla ve tvaru

$$\alpha = k_1 \left[1 + k_2 (u_1)^{k_3} \right], \quad (3.25)$$

kde u_1 je rychlost tekutiny, k_1 , k_2 a k_3 představují konstanty, které je možné pro daný typ stroje najít v literatuře, anebo je možné je určit experimentálně. Rovnice (3.25) zahrnuje jak samovolnou konvekci, tak nucenou konvekci [23, 24]. Za předpokladu lineární závislosti mezi rychlostí tekutiny a otáčkami ve stroji je možné vztah (3.25) uvést podle [26] ve tvaru

$$\alpha = k_1 \left[1 + k_2 (n)^{k_3} \right], \quad (3.26)$$

kde n jsou otáčky rotoru. Konstanty k_1 , k_2 a k_3 ve vztahu (3.26) nabývají odlišných hodnot než v rovnici (3.25). Obě výše zmíněné rovnice je možné použít i na určení součinitele přestupu tepla v různých částech stroje. Výpočet součinitele přestupu tepla z čel vinutí statoru je ve tvaru

$$\alpha = k_1 \left[1 + k_2 \left(\frac{2\pi r_{\text{rt}} n}{60} \right)^{k_3} \right], \quad (3.27)$$

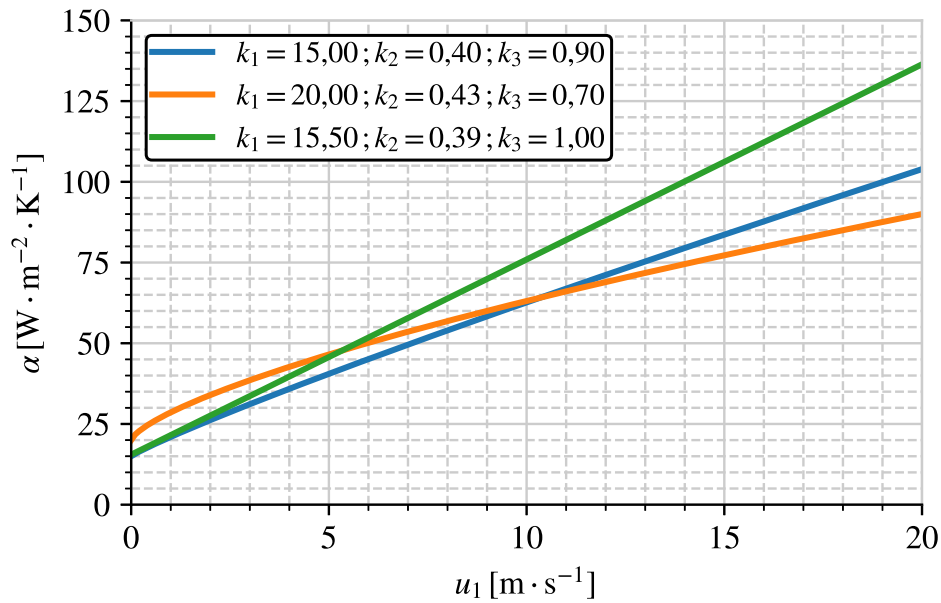
kde r_{rt} je vnější poloměr rotoru. V Tab. 3.1 se nachází konkrétní hodnoty konstant od různých autorů pro různé stroje¹.

Tab. 3.1: Konstanty součinitelů přestupu tepla čel statoru od různých autorů.

Zdroj	k_1	k_2	k_3
[18]	15,50	0,39	1,00
[23]	20,00	0,43	0,70
[24]	15,00	0,40	0,90

Průběhy součinitelů přestupu tepla čel vinutí statoru podle rovnice (3.25) s využitím koeficientů uvedených v Tab. 3.1 jsou vykresleny na Obr. 3.5.

¹Konstanty z [18] a z [24] jsou uvedeny pro ASM a konstanty uvedené v [23] jsou určeny pro PMSM.



Obr. 3.5: Průběhy součinitelů přestupu tepla z čel vinutí statoru v závislosti na obvodové rychlosti rotoru pro různé stroje z [18, 23, 24].

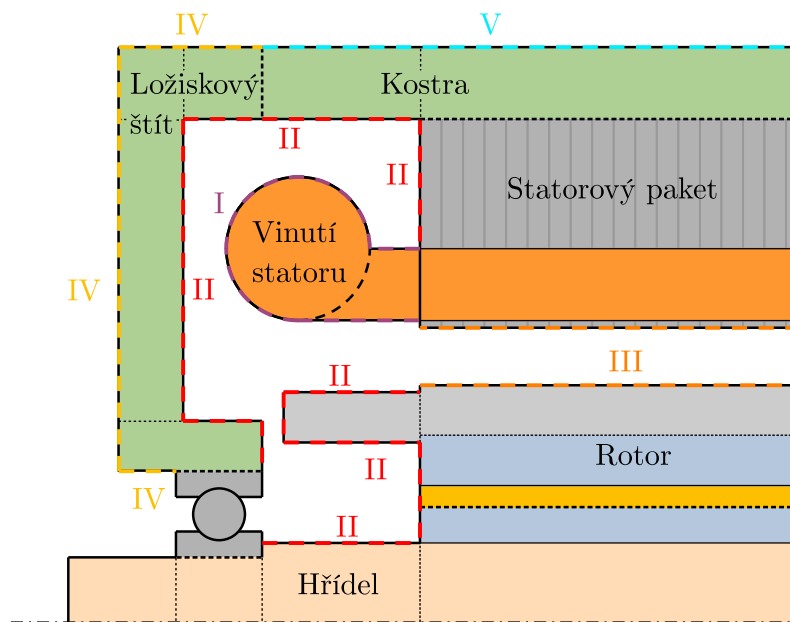
3.5.3 Výpočet součinitelů přestupu tepla v různých částech stroje

Z pohledu otáček v ustáleném stavu je LSPMSM totožný s PMSM, nebo i s ASM, proto byly použity vztahy pro součinitele přestupu tepla v různých částech stroje jako pro PMSM a ASM, které vychází z [9, 27, 28, 29]. Součinitelé přestupu tepla v různých částech stroje jsou uvedeny v Tab. 3.2. Tyto součinitelé jsou ve tvaru dle rovnice (3.26). Konstanta k_3 je pro jednodušší určování součinitelů přestupu tepla zvolena na hodnotě 0,8.

Určení plochy kostry pro součinitele přestupu tepla na kostře v úseku V na Obr. 3.6 je obtížné, proto se velikost povrchu kostry zvětšuje koeficientem, který představuje žebrování. Hodnoty součinitelů přestupu tepla v různých částech stroje se budou dále upravovat tak, aby výsledný model odpovídal měřeným hodnotám.

Tab. 3.2: Vztahy pro výpočet součinitele přestupu tepla v různých částech stroje.

Číslo oblasti	Název oblasti	Vztah
I	Čela vinutí statoru	$\alpha_{cv} = 6 \cdot (1 + 0,02 \cdot n^{0,8})$
II	Statorový paket	$\alpha_{vvzd} = 6 \cdot (1 + 0,02 \cdot n^{0,8})$
III	Vzduchová mezera	α_{Del} Viz kapitola 3.5.1
IV	Kostra	$\alpha_{ko} = 10 \cdot (1 + 0,02 \cdot n^{0,8})$
V	Ložiskový štít	$\alpha_{so} = 6 \cdot (1 + 0,01 \cdot n^{0,8})$



Obr. 3.6: Oblasti s rozdílným druhem prouděním.

Jako další možnost je možné použít pro určení součinitelů přestupu tepla v různých částech stroje software Ansys Fluent.

3.6 Výpočet stykového odporu

Pro dva pevné materiály, které jsou ve styku, je možné uvažovat stykový odpor R_{st} . Rovnice pro výpočet stykového odporu má obdobný tvar jako rovnice (3.17) a je podle [13] ve tvaru

$$R_{st} = \frac{1}{k \cdot S}, \quad (3.28)$$

kde k je součinitel stykového odporu a S je plocha styku. Součinitel stykového odporu má stejný rozměr jako součinitel přestupu tepla. Většinou se součinitel stykového

odporu volí na základě drsnosti povrchu a použitých materiálech. Tyto koeficienty je možné dohledat v [12] a speciálně pro elektrické stroje v [13].

3.7 Fyzikální vlastnosti materiálů pro tepelné výpočty

Pro určení tepelných odporů je nutné vědět, z jakých materiálů se dané části stroje skládají a následně jaké vlastnosti určené materiály mají. Pro výpočet odporů je zapotřebí znát měrnou tepelnou vodivost λ . Tyto odpory se následně dosadí do tepelné sítě. Pokud je zapotřebí řešit tranzientní síť, tedy síť doplněnou tepelnými kapacitami, je potřebné také znát kromě objemu daných částí stroje také objemovou hustotu ρ a měrnou tepelnou kapacitu c . Přehled fyzikálních vlastností běžně se vyskytujících materiálů při teplotě 20 °C pro elektrické stroje je uveden v Tab. 3.3.

Tab. 3.3: Fyzikální vlastnosti používaných materiálů v elektrických strojích [13].

Materiál	Měrná tep. vodivost λ [W/(m·K)]	Měrná tep. kapacita c [J/(kg·K)]	Hustota ρ [kg/m ³]
Hliník, čistý	231	899	2700
Hliník, elektrotechnický	209	896	2700
Měď, elektrotechnická	394	385	8960
Železo, čisté	74,7	452	7897
Železo, litina	40 až 46	500	7300
Uhlíková ocel 0,5 %	45	465	7800
Elektrotechnická ocel, ve sm. laminace ²	22 až 40		7700
Elektrotechnická ocel, kolmo ve sm. laminace	0,6		
Nerezová ocel	17		7900
Konstrukční ocel	35 až 45		
Voda	0,6	4180	997,4
Permanentní magnet, ferit	4,5		
Permanentní magnet, NdFeB	8 až 9	450	7500
Permanentní magnet, Sm-Co	10	370	8400

Přehled měrných tepelných vodivostí izolací je zobrazen v Tab. 3.4.

²Měrné tepelné vodivosti elektrotechnických ocelí jsou uvedeny ve [30].

Tab. 3.4: Měrné tepelné vodivosti některých izolačních materiálů [13].

Materiál	Měrná tep. vodivost λ [W/(m·K)]
Izolace, epoxidové lepidlo	0,64
Izolace, skelná vlákna	0,8 až 1,2
Izolace, Kapton	0,12
Izolace, slída	0,5 až 0,6
Izolace, slídová syntetická pryskyřice	0,2 až 0,3
Izolace, Nomex	0,11
Izolace, Teflon	0,2
Izolace, lak	0,26
Izolace, obecná izolace	0,2

3.8 Výpočet ekvivalentní tepelné vodivosti

Pro některé části elektrického stroje je vhodné použít ekvivalentní měrnou tepelnou vodivost, která v sobě zahrnuje více měrných tepelných vodivostí různých materiálů této části elektrického stroje. Výhoda tohoto nahrazení spočívá v tom, že je možné danou část stroje řešit jako jeden celek, díky tomu se následné výpočty tepelných odporů zjednoduší [18, 31].

Dva materiály o různých tepelných vodivostech je možné uspořádat buď sériově nebo paralelně. Tato uspořádání jsou zobrazena na Obr. 3.7. Celkový tepelný tok \dot{Q} na Obr. 3.7 prochází ve vyznačeném směru, tedy teplota ϑ_1 je vyšší než teplota ϑ_2 . Dále jsou na Obr. 3.7 vyznačeny části s měrnými tepelnými vodivostmi λ_1 a λ_2 [18, 31].

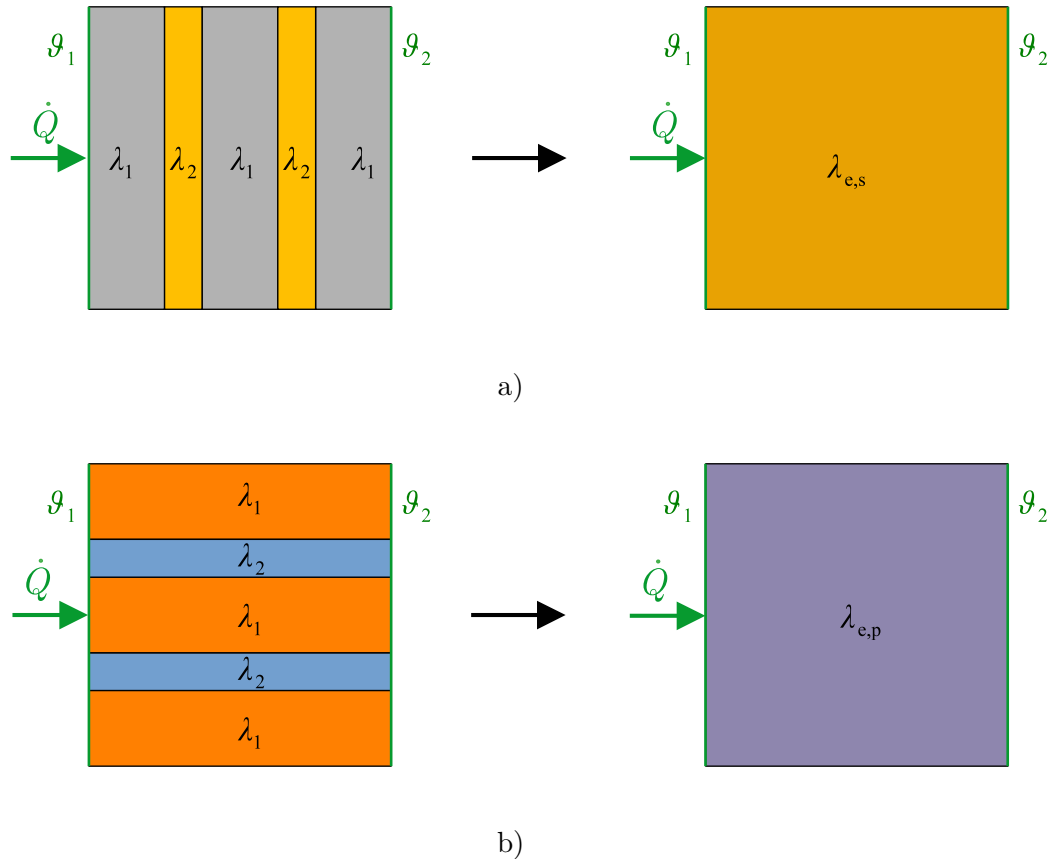
Sériové řazení dvou různých materiálů je zobrazeno na Obr. 3.7 a). Rovnice pro výpočet sériové ekvivalentní měrné tepelné vodivosti $\lambda_{e,s}$ je podle [18, 31] ve tvaru

$$\lambda_{e,s} = \frac{V_1 \lambda_1 + V_2 \lambda_2}{(V_1 + V_2)}, \quad (3.29)$$

kde λ_1 a λ_2 jsou jednotlivé měrné tepelné vodivosti v daných částech stroje, V_1 je celkový objem tělesa tvořený materiálem s měrnou tepelnou vodivostí λ_1 a V_2 je celkový objem tělesa tvořený materiálem s měrnou tepelnou vodivostí λ_2 .

Pro případ na Obr. 3.7 b), tedy pro paralelní řazení, je podle [18, 31] možné využít vztahu

$$\lambda_{e,p} = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (V_1 + V_2)}{V_1 \lambda_2 + V_2 \lambda_1}. \quad (3.30)$$



Obr. 3.7: Nahrazení částí ekvivalentní tepelnou vodivostí, a) Sériové řazení a následné nahrazení částí ekvivalentní tepelnou vodivostí, b) paralelní řazení a následné nahrazení částí ekvivalentní tepelnou vodivostí.

3.8.1 Náhrada kombinace rotorových zubů a tyčí jednotným objemem s ekvivalentní tepelnou vodivostí

Jako příklad je zde uvedena náhrada tepelné vodivosti rotorových tyčí a rotorových zubů ekvivalentní tepelnou vodivostí zahrnující tyto dva materiály. Na Obr. 3.8 je zobrazena tato náhrada. Ohraničení objemu pro výpočet ekvivalentní tepelné vodivosti bylo provedeno po vnitřní poloměr tyčí.

V tomto konkrétním případě se jedná o paralelní řazení a to jak v radiálním, tak v axiálním směru, proto budeme vycházet z rovnice (3.30) pro oba směry. Vzorec pro měrnou tepelnou vodivost $\lambda_{e,rad}$ v radiálním směru je ve tvaru

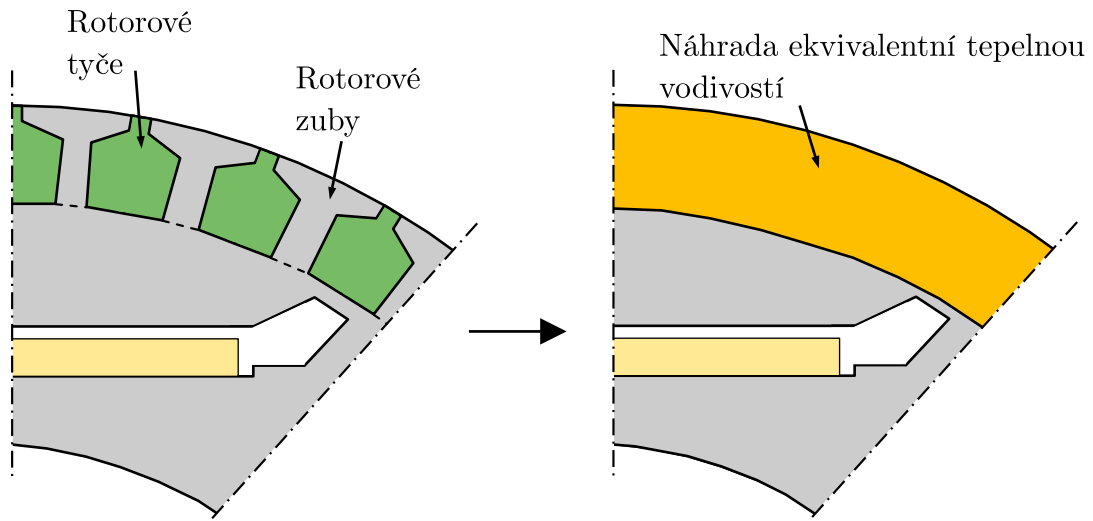
$$\lambda_{e,rad} = \frac{\lambda_{zuby,rad} \lambda_{tyče} (V_{zuby} + V_{tyče})}{V_{zuby} \lambda_{tyče} + V_{tyče} \lambda_{zuby,rad}}, \quad (3.31)$$

kde $\lambda_{zuby,rad}$ je měrná tepelná vodivost zubů rotoru v radiálním směru, $\lambda_{tyče}$ je měrná tepelná vodivost tyčí rotoru, tyto tyče mají stejnou tepelnou vodivost v radiálním

i v axiálním směru, V_{zuby} je objem rotorových zubů a $V_{\text{tyče}}$ reprezentuje objem rotorových tyčí. Pro měrnou tepelnou vodivost v axiálním směru je rovnice (3.30) ve tvaru

$$\lambda_{e,ax} = \frac{\lambda_{\text{zuby},ax} \lambda_{\text{tyče}} (V_{\text{zuby}} + V_{\text{tyče}})}{V_{\text{zuby}} \lambda_{\text{tyče}} + V_{\text{tyče}} \lambda_{\text{zuby},ax}}, \quad (3.32)$$

kde $\lambda_{\text{zuby},ax}$ je měrná tepelná vodivost plechů v axiálním směru.



Obr. 3.8: Náhrada kombinace rotorových zubů a rotorových tyčí jednotným objemem s ekvivalentní tepelnou vodivostí.

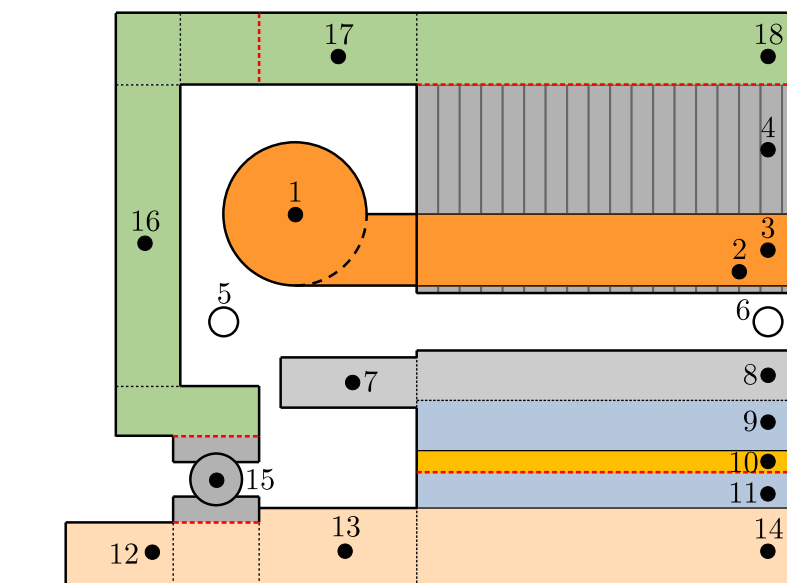
4 Tepelný model LSPMSM

Tato kapitola se zabývá tepelným modelem LSPMSM. Na začátku je zde uvedena kompletní tepelná síť LSPMSM, která se skládá z tepelných odporů uvedených v kapitole 3. Značení vstupních geometrických rozměrů použitých do výpočtu je uvedeno v první polovině této kapitoly. Dále se zde nachází měření LSPMSM, které blíže popisuje osazení stroje teplotními odporovými čidly a uspořádání pracoviště.

Výsledky měření při různých zatíženích jsou uvedeny v měření oteplovacích charakteristik LSPMSM. Pro zpřesnění tepelného modelu LSPMSM podle výsledných průběhů z měření byly použity metody na identifikaci vybraných vstupních parametrů. Na konci této kapitoly je zobrazeno srovnání změřených oteplovacích charakteristik LSPMSM s oteplovacími charakteristikami tepelného modelu LSPMSM.

4.1 Rozmístění uzlů tepelného modelu LSPMSM

Na Obr. 4.1 je zobrazeno rozmístění uzlů v LSPMSM. V každém uzlu je počítána střední teplota dané části.



Obr. 4.1: Rozmístění uzlů v LSPMSM.

Tab. 4.1: Význam jednotlivých uzlů rozmístěných na Obr. 4.1.

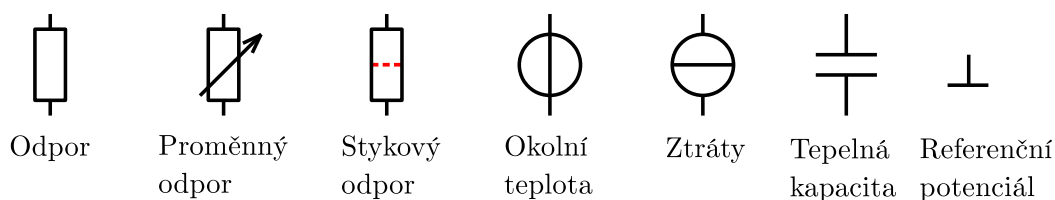
Číslo a název uzlu

1 - Čelo vinutí statoru	9 - Jho rotoru, oblast I
2 - Vinutí v drážkách statoru	10 - Permanentní magnet
3 - Zuby statoru	11 - Jho rotoru, oblast II
4 - Jho statoru	12 - Hřídel, oblast ložisek
5 - Oblast vnitřního vzduchu	13 - Hřídel, oblast vnitřního vzduchu
6 - Oblast vzduchové mezery	14 - Vnitřní část hřídele
7 - Kruh rotoru	15 - Ložisko
8 - Homogenizovaná klec a zuby rotoru	16 - Ložiskový štít

Protože se předpokládá symetrické rozložení teplot v axiálním směru, je možné uvažovat pouze polovinu stroje. Význam jednotlivých uzlů tepelného modelu se nachází v Tab. 4.1. Vertikální čárkovaná čára na Obr. 4.1 znázorňuje rovinu symetrie poloviny stroje a čerchovaná čára představuje rotační symetrii. Červené přerušované čáry na Obr. 4.1 značí oblasti, ve kterých je uvažován stykový odpor, viz kapitola 3.6. Vzduchová mezera je na Obr. 4.1 zobrazena schématicky, její šířka je obvykle v řádu desetin až jednotek milimetrů [13].

4.2 Tepelná síť LSPMSM

Na Obr. 4.3 je zobrazena výsledná tepelná síť LSPMSM. Počet uzlů tepelné sítě odpovídá Obr. 4.1. Tepelná síť je rozdělena dle axiální symetrie na polovinu. Jedná se o běžný zjednodušující postup, viz [18, 20]. Jednotlivé tepelné odpory jsou zobrazeny schématickými značkami, tyto značky se nachází na Obr. 4.2.



Obr. 4.2: Význam schematických značek na Obr. 4.3.

Kromě tepelných odporů jsou na Obr. 4.2 zobrazeny zdroje a tepelné kapacity. Napěťový zdroj představuje okolní teplotu a proudový zdroj reprezentuje ztráty.

Jak už bylo zmíněno výše, existuje určitá analogie mezi elektrickými a tepelnými veličinami, viz kapitolu 2.2.

Zelené uzly 17 a 18 představují kostru stroje. Z těchto uzlů jsou odváděny téměř všechny ztráty ze stroje do okolí přes žebra nucenou konvekcí pomocí axiálního proudění. Další část tepla se odvádí pomocí ložiskového štítu přes hřídel a ložisko pomocí konvekce do okolí.

Tmavě šedý uzel s číslem 15 na Obr. 4.3 značí ložisko. Tepelný odpor ložiska je náročné určit, proto je zvolen jako jeden z identifikovaných parametrů pro tepelný model, viz kapitolu 4.5.1. Výpočtem tepelného odporu ložiska se věnují [9, 13, 18].

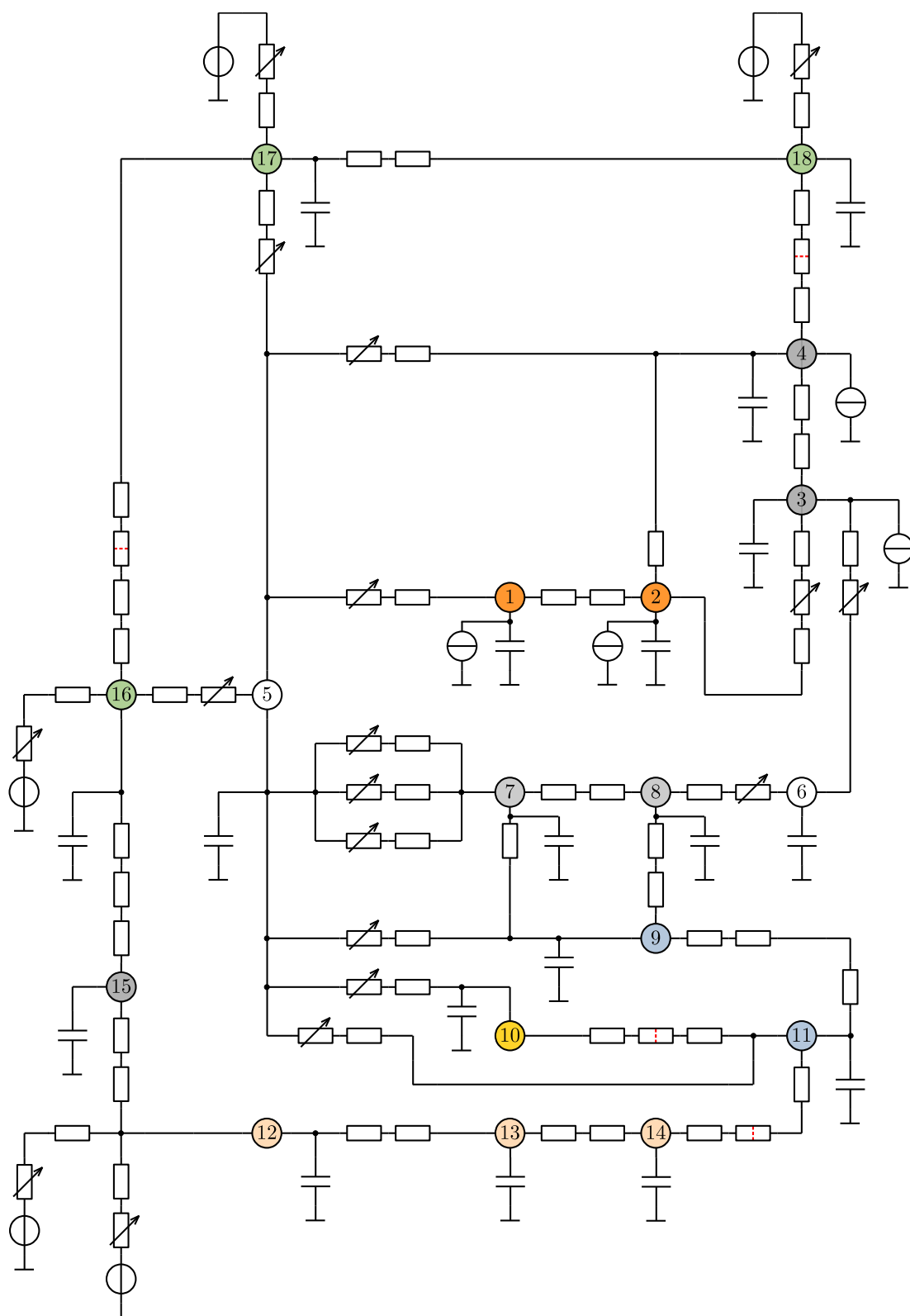
Hřídel je rozdělena na 3 úseky, tedy uzel 12 až uzel 14. První úsek odpovídá uzlu 12 a je to oblast, která je přímo v kontaktu s okolním vzduchem i ložiskem. Tepelný tok se zde rozděluje v určitém poměru podle daných ploch této části hřídele. Druhý úsek se nachází v oblasti vnitřního vzduchu, tento úsek hřídele slouží jako tepelný most k vedení tepla. Jen malá část tepla se zde odvede konvekcí z vnitřního povrchu hřídele. Poslední úsek, tedy uzel 14, se nachází ve vnitřní části rotoru stroje. Zde dochází ke kontaktu jha rotoru a hřídele, proto je v sériové kombinaci odporů mezi uzlem 11 a 14 zahrnut odpor, který zohledňuje součinitel stykového odporu, který je popsán v kapitole 3.6.

Modré uzly 9 a 11 představují jho rotoru. Toto jho je rozděleno na dvě části. Mezi těmito částmi se nachází permanentní magnety. Vnější a vnitřní části jha jsou navzájem spojeny tepelně vodivými mosty. Pro tepelnou síť jsou tyto mosty zobrazeny tepelným odporem mezi uzlem 9 a 11.

Žlutý uzel s číslem 10 znázorňuje na Obr. 4.3 permanentní magnety. Magnety jsou připevněny pomocí lepidla na část jha, která se nachází blíže hřídeli rotoru, uzel 11. Drážka uvnitř jha rotoru není zcela zaplněna permanentním magnetem, proto se uvažuje vrstva vzduchu, která se při rotaci rotoru předpokládá za téměř statickou, proto je možné tuto vrstvu předpokládat za téměř tepelně nevodivou. Díky tomuto se tepelný tok odvádí pouze přes tepelné mosty. Konstrukcí rotoru se věnovala kapitola 1.

Uzel 7 reprezentuje kruh rotoru nakrátko, který spojuje tyče a zuby rotoru. Tyče spolu se zuby byly homogenizovány, díky tomu je možné zjednodušit tepelnou síť. Blíže se homogenizací zabývala kapitola 3.8.

Vnitřní vzduch, uzel 5, představuje místo, které spojuje přes přenos tepla pomocí konvekce ostatní části LSPMSM. Podobně je koncipován i uzel 6, tedy oblast vzduchové mezery. Pro určení tepelných odporů mezi vnitřním vzduchem a dalšími částmi stroje, stejně tak mezi vzduchovou mezerou a zuby statoru či homogenizovanou částí rotoru, mají největší váhu v sériové kombinaci tepelných odporů mezi uzly právě tepelné odpory vypočtené pomocí součinitelů přestupu tepla. Tato problematika je popsána v kapitole 3.5.



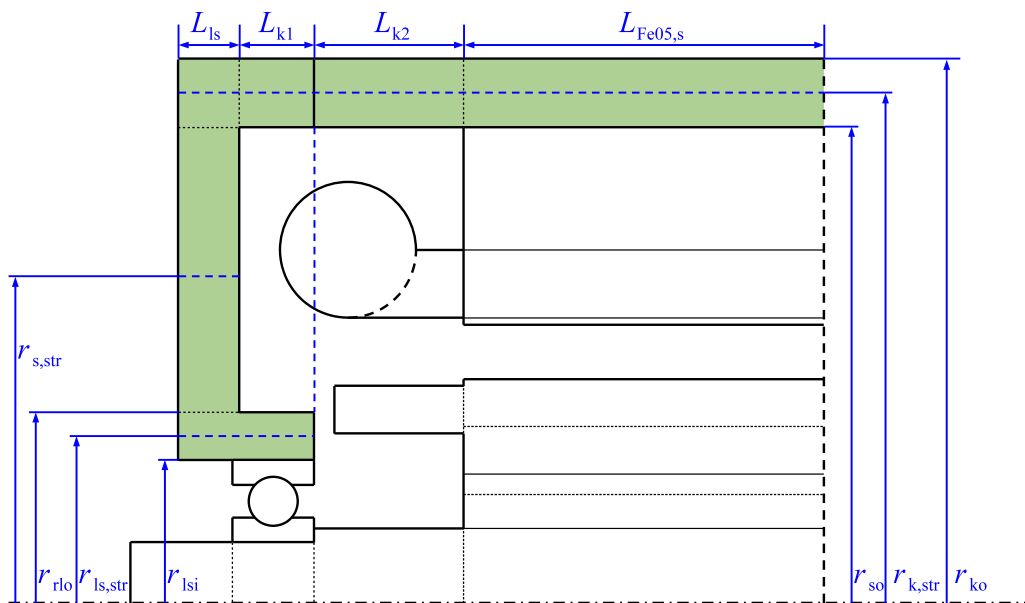
Obr. 4.3: Kompletní tepelná síť LSPMSM.

Vinutí stroje je popsáno oranžovými uzly označenými čísly 1 a 2. Pro určení tepelných vodivostí v radiálním i axiálním směru bylo použito postupu uvedeném v [32]. Této problematice se také věnují [33, 34, 35]. Jelikož je vinutí tvořeno jednotlivými lakovanými vodiči tvořenými elektrotechnickou mědí, předpokládá se dobrá tepelná vodivost v axiálním směru a nízká tepelná vodivost v radiálním směru. Jednotlivé vodiče v drážce statoru byly nahrazeny jednou homogenní tyčí s ekvivalentními tepelnými vlastnostmi. I když je tepelná vodivost v radiálním směru malá, díky velké ploše se podstatná část tepelných ztrát odvede do statorových plechů radiálně.

Čela jsou složena obdobně jako vinutí. Vzhledem ke složitosti aproximace čel ekvivalentní tepelnou vodivostí bylo zavedeno zjednodušení, které spočívá v nahrazení čel vinutí statoru toroidem, který má dobrou tepelnou vodivost v tangenciálním směru, to je pravoúhlý směr k ose otáčení. Dále do tohoto toroidu vstupují jednotlivé vodiče nahrazené homogenní tyčí s ekvivalentními tepelnými vlastnostmi popsanými výše.

4.3 Značení vstupních geometrických rozměrů použitých do výpočtu

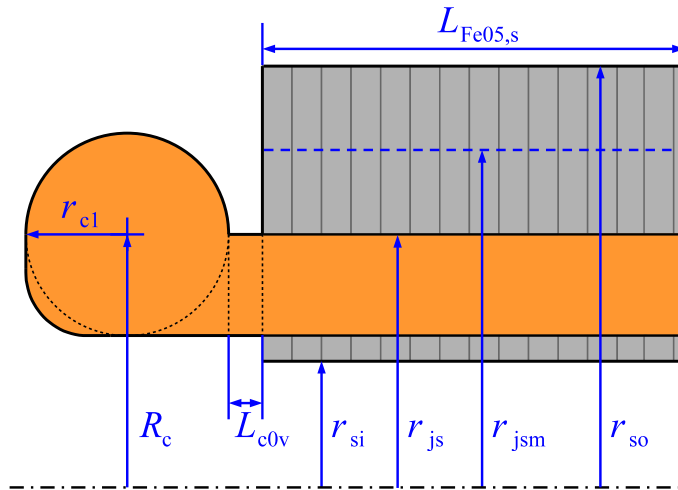
Při výpočtu jednotlivých tepelných odporů daných částí stroje na Obr. 4.3 je zapotřebí správně určit geometrické rozměry stroje, které vycházejí z technické dokumentace. Na Obr. 4.4 je zobrazeno značení geometrických rozměrů kostry a ložiskového štítu LSPMSM.



Obr. 4.4: Značení geometrických rozměrů kostry a ložiskového štítu LSPMSM.

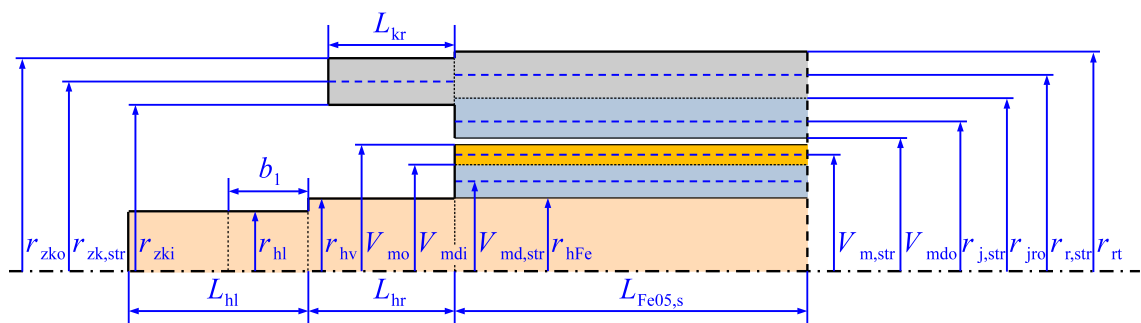
Pro tepelný model LSPMSM je kostra zjednodušena do podoby válcového mezikruží bez chladicích žebér. Pro ekvivalentní tepelné chování kostry LSPMSM je zaveden do tepelného odporu chladicí koeficient. Další zjednodušení spočívá v úpravě tvaru ložiskového štítu do podoby na Obr. 4.4.

Značení geometrických rozměrů statorového paketu je uvedeno na Obr. 4.5. Je zde uvedena pouze polovina stroje v axiálním směru. Průřez toroidu na Obr. 4.5 byl vypočten na základě počtu vodičů v drážce a činitele plnění [32]. U analyzovaného stroje je tento průřez stanoven na šestinásobek průřezu statorové drážky.



Obr. 4.5: Značení geometrických rozměrů statorového paketu LSPMSM.

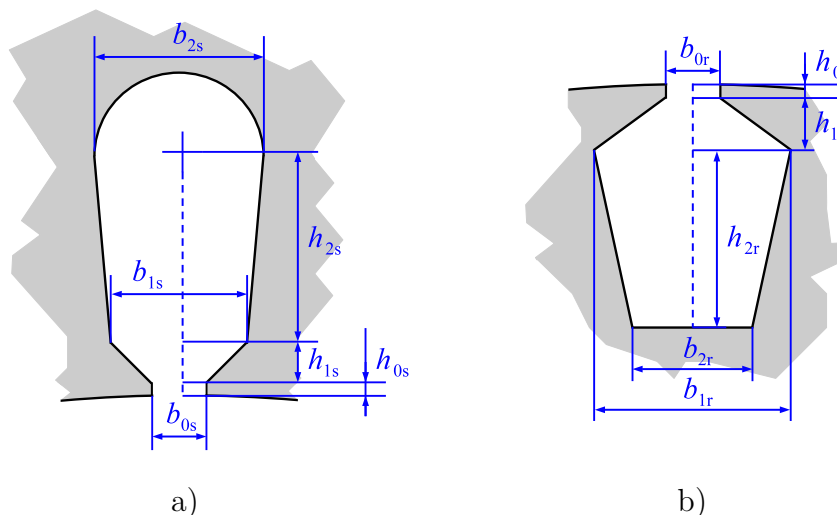
Na Obr. 4.6 je zobrazen řez rotorem a jsou zde uvedeny na Obr. 4.6 vstupní geometrické proměnné rotoru LSPMSM. I zde je postačující uvést jen polovinu rotoru LSPMSM.



Obr. 4.6: Značení geometrických rozměrů rotoru LSPMSM.

Pro přesné určení tepelných odporů vinutí je zapotřebí detailně znát geometrii statorové drážky. Značení geometrických rozměrů statorové drážky LSPMSM je

zobrazeno na Obr. 4.7 a). Na Obr. 4.7 b) je znázorněno značení vstupních geometrických rozměrů rotorové drážky LSPMSM. Význam jednotlivých vstupních geometrických rozměrů je uveden v příloze, Tab. A.1. Materiálové vlastnosti jsou uvedeny v Tab. A.2.



Obr. 4.7: a) Značení geometrických rozměrů statorové drážky LSPMSM, b) Značení geometrických rozměrů rotorové drážky LSPMSM.

4.4 Měření LSPMSM

V této části je uveden popis osazení motoru teplotními čidly, měření oteplovacích charakteristik LSPMSM a porovnání s vypočtenými oteplovacími charakteristikami LSPMSM.

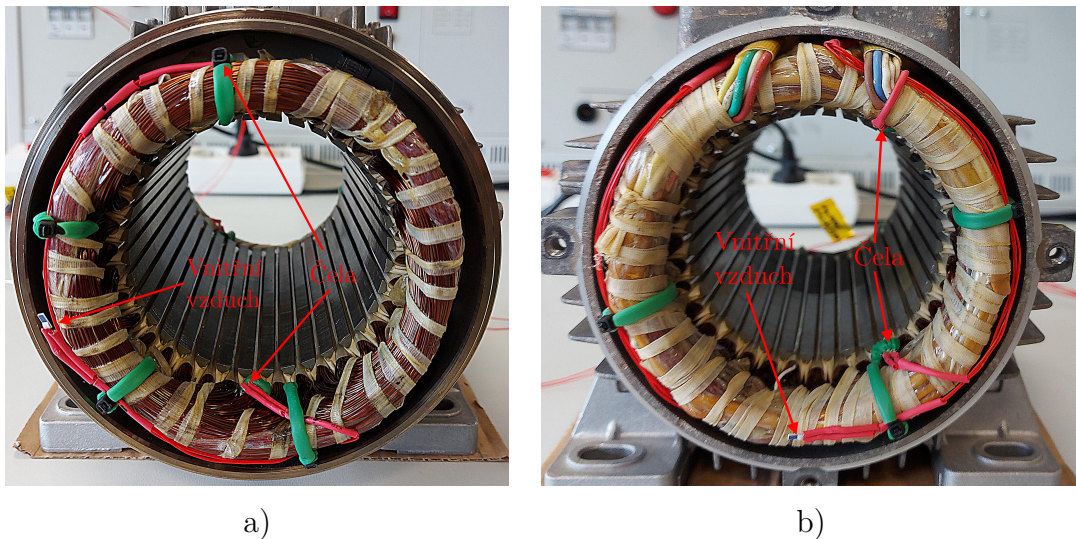
4.4.1 Příprava motoru na měření oteplovacích charakteristik

Z výroby byl LSPMSM osazen teplotními čidly v obou čelech a ve drážce statorového paketu. Při prvních měřeních se tato čidla ukázala jako velmi nepřesná. Konkrétně se jedná o teplotní čidla KTY84, viz [39].

Proto byl stroj rozebrán a byla na čela připevněna teplotní čidla PT1000, která disponují velmi dobrou přesností¹, viz [40]. Celkem bylo rozmístěno šest teplotních čidel uvnitř LSPMSM. Dvě čidla byla umístěna na každé čelo vinutí statorového paketu LSPMSM, konkrétně první čidlo na horní část čela, druhé na spodní část čela a třetím čidlem se měřila vnitřní teplota vzduchu. Detailní rozmístění teplotních čidel PT1000 je možné vidět na Obr. 4.8. Jelikož jsou čtyři teplotní čidla umístěna

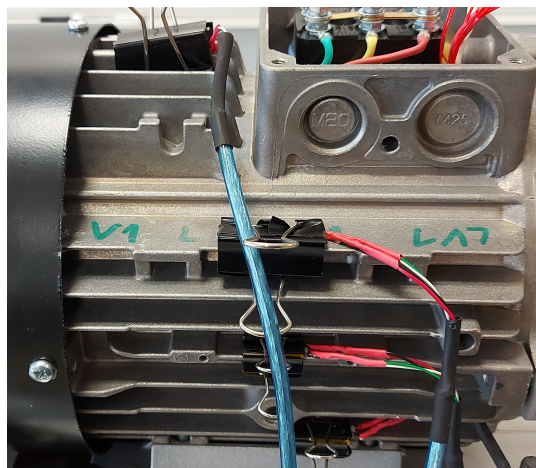
¹Výstupní odpor čidla PT1000 je 1000 Ω při 0 °C. Maximální odchylka tohoto teplotního čidla je při 0 °C $\pm 0,15$ K.

na vinutí čela, bude se předpokládat za střední teplotu čela jejich průměrná hodnota. Průměrná teplota ze zbylých dvou teplotních čidel bude předpokládána jako střední teplota vnitřního vzduchu.



Obr. 4.8: Osazení čel LSPMSM teplotními čidly PT1000, a) Čelo LSPMSM osazené teplotními čidly PT1000 ze strany ventilátoru, b) Čelo LSPMSM osazené teplotními čidly PT1000 ze strany hřídele.

Jelikož se teplotní čidla nacházejí v bezprostřední blízkosti vinutí stroje, projevuje se v přívodních vodičích těchto teplotních čidel nežádoucí elektromagnetické rušení. Pro co největší potlačení tohoto rušení byly použity odrušovací tlumivky.



Obr. 4.9: Osazení kostry LSPMSM teplotními čidly.

Dále byla umístěna teplotní čidla na kostru LSPMSM. Na kostře se nacházejí čtyři teplotní čidla. První tři teplotní čidla byla umístěna na horizontální chladič

žebra jedné strany kostry a poslední teplotní čidlo bylo umístěno na prostřední vertikální chladičí žebro kostry stroje poblíž svorkovnice. Na Obr. 4.9 je zobrazeno umístění teplotních čidel na kostře.

V neposlední řadě bylo teplotní čidlo umístěno na ložiskový štít LSPMSM na straně hřídele. Pomocí pružného kovu, který se uchytil prostřednictvím šroubu, bylo teplotní čidlo přitlačováno k ložiskovému štítu. Toto řešení je možné vidět na Obr. 4.10.



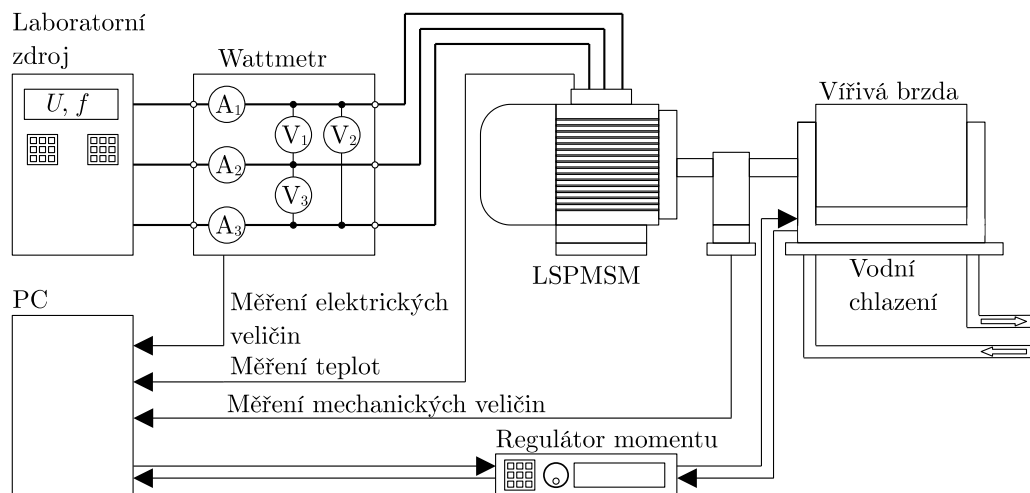
Obr. 4.10: Osazení ložiskového štítu LSPMSM teplotním čidlem.

Nakonec byl motor ještě osazen teplotním čidlem na měření okolní teploty přibližně 15cm od měřeného stroje. Je vhodné poznamenat, že na měření všech vnějších částí stroje byly použity teplotní odporová čidla PT 100, která jsou relativně přesná², viz [42].

²Pro přesnější měření teplot pomocí teplotních odporových čidel PT100 bylo použito čtyřvodičové zapojení [41].

4.4.2 Popis laboratorního pracoviště

Schématické uspořádání měřicího stanoviště pro měření oteplovacích charakteristik je zobrazeno na Obr. 4.11.



Obr. 4.11: Uspořádání pracoviště pro měření LSPMSM.

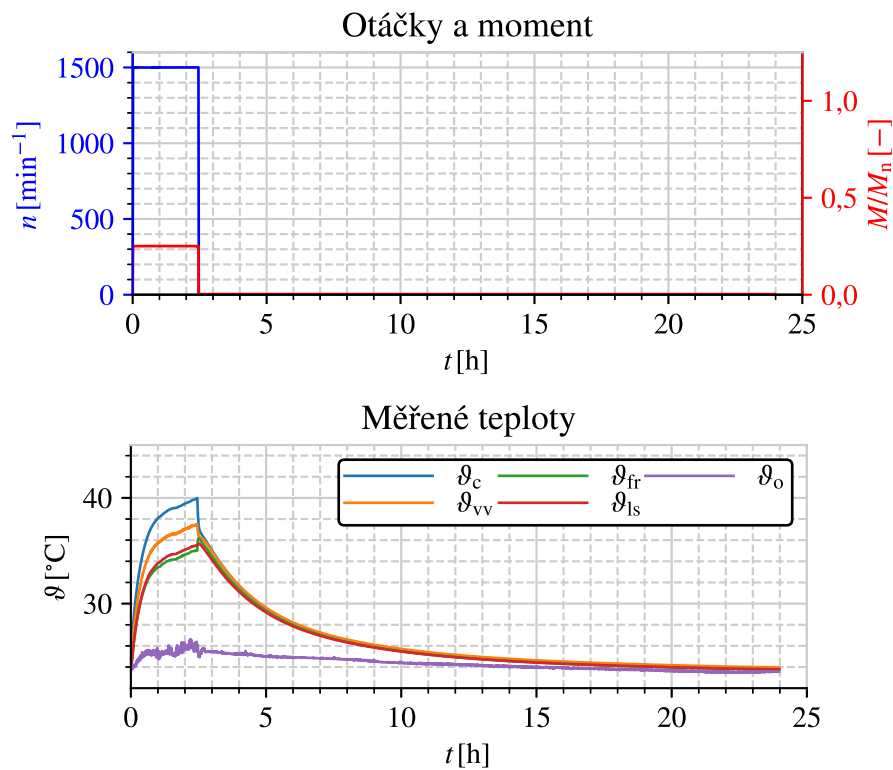
Záznam wattmetru a záznam teplotních čidel zprostředkovaný díky měřicím kartám byl pomocí Ethernetu připojen k počítači. Regulátor momentu byl připojen k vířivé brzdě a přes sběrnici GPIB byla posílána a přijímána data počítačem. Testovaný motor byl přes spojku mechanicky připojen ke snímači točivého momentu a otáček a následně další spojkou spojen s vířivou brzdou. Mechanický výkon se ve vířivé brzdě přemění na teplo, které je pak odvedeno vodním chlazením.

Měření teplot, mechanických veličin i veličin elektrických je zapisováno do společného souboru s krokem přibližně jedna sekunda. Tato naměřená data se dále zpracovávala v programovacím jazyku Python.

4.4.3 Měření oteplovacích charakteristik LSPMSM

Výsledky oteplovacích charakteristik při různých zatěžovacích momentech jsou uvedeny na Obr. 4.12 a) až e). Motor má jmenovitý výkon na hřídeli $P_2 = 1500$ W při zatěžovacím momentu $M_n = 9,56$ Nm při jmenovitém fázovém napětí $U_s = 230$ V a jmenovitém fázovém proudu $I_s = 2,52$ A. Popis jednotlivých oteplovacích charakteristik na Obr. 4.12 je uveden v poznámce pod čarou³.

Některé postupy pro měření oteplovacích charakteristik byly provedeny podle normy ČSN EN 60034-2-1 [43]. Velikosti zátěžných momentů jsou uvedeny jako poměrné hodnoty vůči jmenovitému zatěžovacímu momentu. Běžně se jedná o hodnoty 25%, 50%, 75%, 100% jmenovité hodnoty. Motor nebylo možné měřit nad jmenovitý moment kvůli vířivé brzdě⁴.

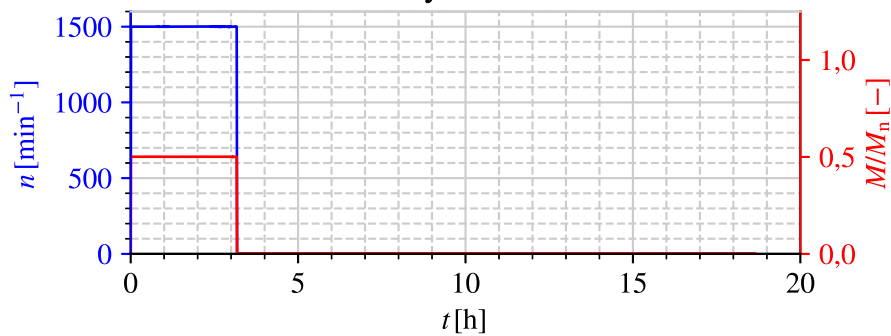


a) $M = 25\% \cdot M_n$

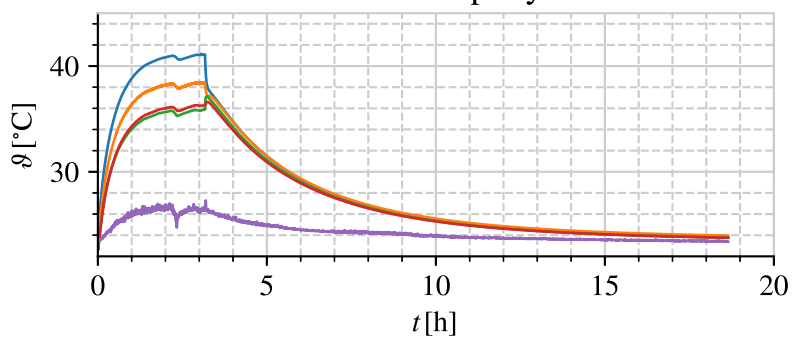
³Popis jednotlivých průběhů: ϑ_c - střední teplota čela statorového paketu, ϑ_{fr} - střední teplota kostry, ϑ_o - teplota okolí, ϑ_{vv} - střední teplota vnitřního vzduchu stroje, ϑ_{ls} - střední teplota ložiskového štítu.

⁴Maximální zatěžovací moment vířivé brzdy je 10 Nm.

Otáčky a moment

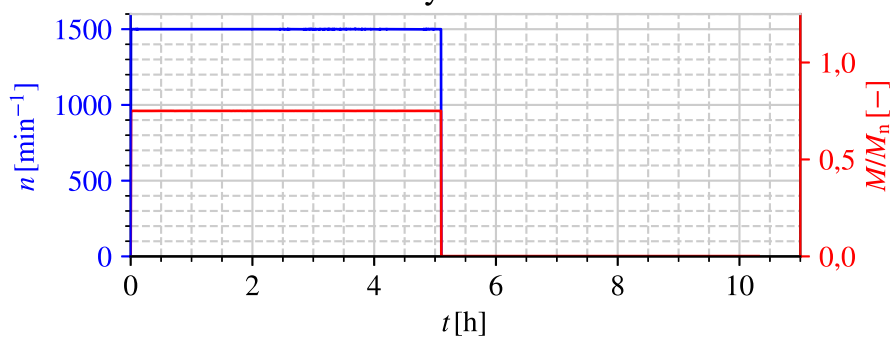


Měřené teploty

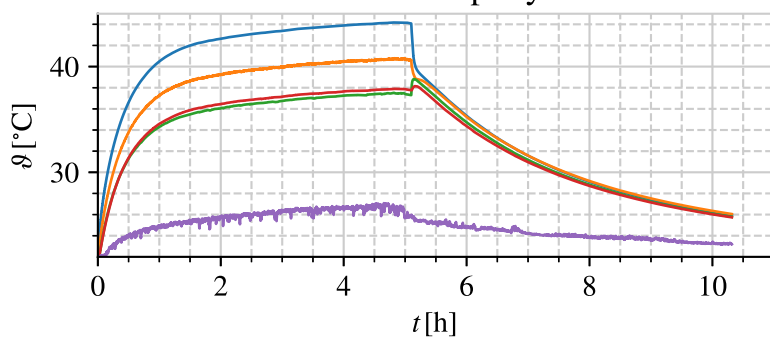


b) $M = 50\% \cdot M_n$

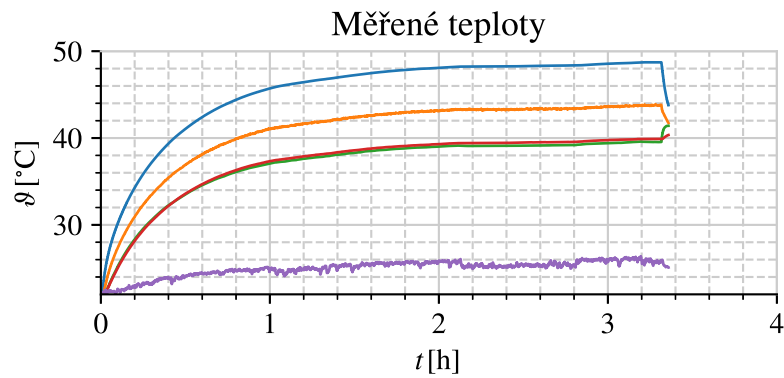
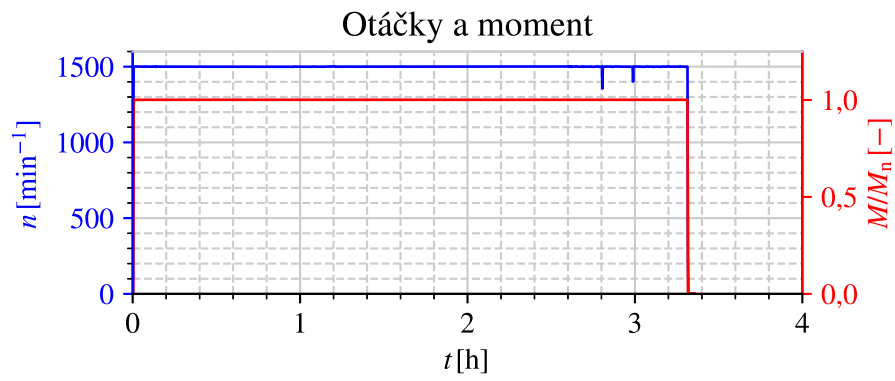
Otáčky a moment



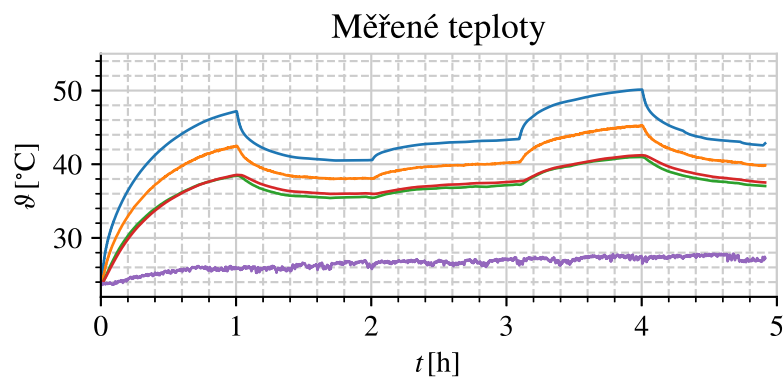
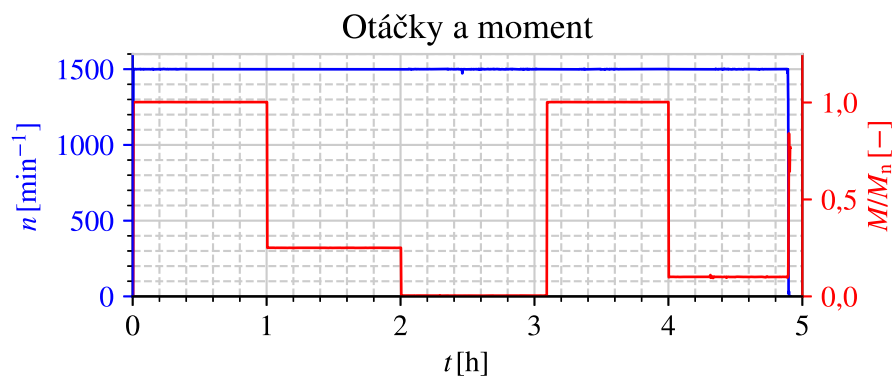
Měřené teploty



c) $M = 75\% \cdot M_n$



d) $M = 100\% \cdot M_n$



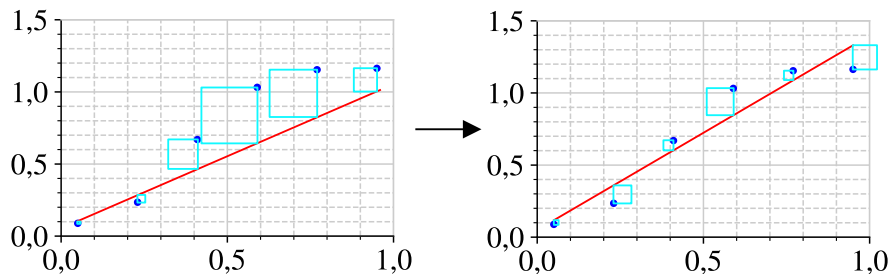
e) Proměnlivé zatížení

Obr. 4.12: Změřené oteplovací charakteristiky při různých zatěžovacích momentech.

4.5 Metody pro identifikaci určených vstupních parametrů tepelného modelu LSPMSM

Tyto metody slouží pro hledání optimálního řešení funkce nebo modelu. Pro správnou funkci metod pro hledání vstupních parametrů je zapotřebí správně zvolit identifikované parametry. Počet parametrů se může měnit v závislosti na složitosti funkce či modelu. V této práci byly hledány optimální hodnoty pro 11 vybraných parametrů, jejich konkrétní hodnoty a popis je uveden v následující kapitole. Tato práce se věnuje dvěma metodám, a to metodě nejmenších čtverců (LSM) a metodě využívající roj částic (PSO).

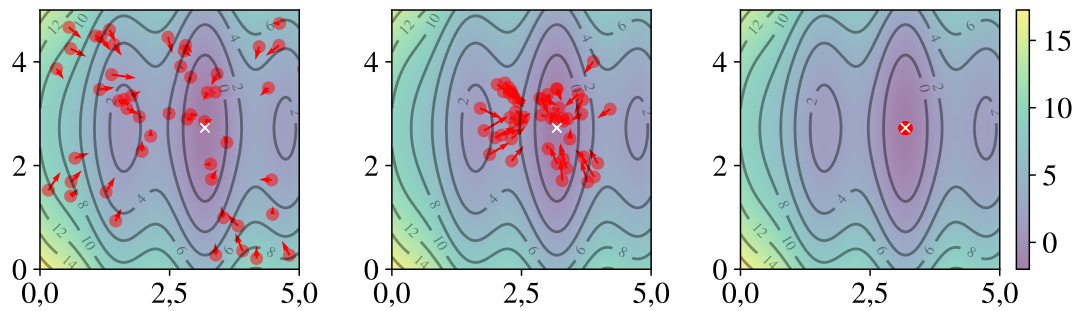
LSM má za úkol minimalizovat součty čtverců odchylek. To znamená, že jsou identifikované parametry funkce nebo modelu měněny, dokud nejsou výsledné druhé mocniny odchylek mezi měřenými body a mezi výslednými body funkce nebo modelu minimalizovány, tedy mají mezi sebou co nejmenší plochu [44, 45, 46]. Dále je tato metoda v práci využita tak, že se identifikují parametry takovým způsobem, aby byla minimalizována suma odchylek mezi měřenými teplotami a teplotami vypočtenými pomocí tepelného modelu LSPMSM. Pro použití této metody na tepelný model byla využita knihovna *SciPy.optimize* v programovacím jazyku Python. Konkrétně byl použit příkaz *scipy.optimize.least-squares* [47]. Na Obr. 4.13 je zjednodušeně znázorněna metoda LSM.



Obr. 4.13: Princip funkce metody nejmenších čtverců.

PSO je dosti odlišná od LSM. Tato metoda vytvoří roj o požadované velikosti, například o velikosti sto jedinců v podobě bodů. Pozice a počáteční rychlost každého bodu je náhodně generována. Roj se postupně pohybuje a hledá co nejmenší odchylku měřených bodů od výsledků funkce či modelu na základě vstupních parametrů. Celý roj se zkoncentruje ideálně v jednom místě [48, 49]. Tato metoda byla využita pro hledání vstupních parametrů tepelného modelu z knihovny *Pymoo*. Byl použit příkaz *minimize* [47]. Implementace knihovny *Pymoo* do kódu v programovacím jazyce Python není tak jednoduchá jako implementace knihovny *SciPy.optimize*.

Na druhou stranu obsahuje knihovna *Pymoo* mnohem více metod pro identifikaci



Obr. 4.14: Princip funkce metody využívající roj částic.

parametrů, momentálně 19 metod. Na Obr. 4.14 je znázorněn princip metody PSO. Bílý křížek v grafech na Obr. 4.14 je globální minimum funkce. K tomuto minimu se snaží roj bodů co nejvíce přiblížit.

Každá z výše popsaných metod má své přednosti a nedostatky. Například implementace LSM z knihovny *SciPy.optimize* do programovacího jazyka Python je jednodušší než implementace PSO z knihovny *Pymoo*. Knihovna *SciPy* je efektivní na jednodušší modely nebo funkce. Při použití na tepelný model vyžadovala spoustu argumentů na správnou identifikaci vstupních parametrů modelu *SciPy.optimize*, nicméně po té tato funkce identifikovala parametry rychle s relativně dobrou přesností.

PSO z knihovny *Pymoo* na druhou stranu nepotřebovala skoro žádné argumenty pro správnou funkci. Tato metoda je na identifikaci vstupních parametrů tepelného modelu mnohem pomalejší. To je způsobeno samotným principem fungování PSO, který byl popsán výše. Konkrétní doby trvání a přesnosti obou metod jsou podrobně popsány v následující kapitole, také jsou v této kapitole zobrazeny konkrétní hodnoty počátečních podmínek vstupních parametrů tepelného modelu a nastavení hranic identifikovaných parametrů tohoto tepelného modelu.

4.5.1 Identifikace vybraných vstupních parametrů pro tepelný model LSPMSM

Počáteční identifikované vybrané vstupní parametry pro tepelný model LSPMSM včetně ohraničení a výsledků identifikovaných vybraných parametrů jsou uvedeny v Tab. 4.3. Význam vybraných identifikovaných parametrů se pro Tab. 4.3 nachází v poznámce pod čarou.

Tab. 4.3: Počáteční identifikované vybrané vstupní parametry pro tepelný model LSPMSM včetně ohraničení a výsledků identifikovaných vybraných parametrů.

Parametr ⁵	Počáteční	Spodní	Horní	Výsledky	
	hodnota	hranice	hranice	LSM	PSO
α_{hso}	600,00	550,00	900,00	558,285	562,631
α_{idk}	280,00	250,00	320,00	264,884	254,041
$k_{1,\alpha,\text{ko}}$	10,00	12,00	5,00	9,781	9,335
$k_{2,\alpha,\text{ko}}$	0,02	0,01	0,03	0,0209	0,0192
$k_{1,\alpha,\text{so}}$	6,00	2,00	10,00	2,314	3,352
$k_{2,\alpha,\text{so}}$	0,01	0,005	0,03	0,00564	0,008
$k_{1,\alpha,\text{vvzd}}$	6,00	3,00	10,00	7,348	7,302
$k_{2,\alpha,\text{vvzd}}$	0,02	0,01	0,04	0,0134	0,0132
$k_{1,\alpha,\text{cv}}$	6,00	3,00	8,00	6,531	6,546
$k_{2,\alpha,\text{cv}}$	0,02	0,01	0,04	0,0102	0,0114
R_{loz}	1,50	0,50	2,50	2,066	2,114

Počáteční hodnota součinitele stykového odporu mezi jhem statoru a kostrou α_{hso} vychází z [13]. Počáteční hodnota součinitele stykového odporu mezi vinutím ve statorové drážce a zubem statoru α_{idk} byla stanovena na základě hodnot uvedených v [50, 51, 52]. Počáteční hodnoty konstant k_1 a k_2 identifikovaných parametrů pro součinitele přestupu tepla vycházejí z Tab. 3.2. Dále se konstanty k_1 a k_2 dosazují do vztahu (3.26) pro získání součinitelů přestupu tepla tepelného modelu LSPMSM. Počáteční hodnota tepelného odporu ložiska R_{loz} byla určena na základě [9, 13, 18]. Všechny vybrané identifikované parametry jsou v základních jednotkách.

LSM potřebuje ke své správné funkci počáteční hodnoty pro identifikaci parametrů, dále potřebuje hranice. Hranice jsou důležité, protože by mohly některé identifikované parametry nabýt fyzikálně nereálných hodnot. PSO potřebuje pouze hranice.

Celkový čas výpočtu přechodného tepelného modelu LSPMSM se v závislosti na délce měření pohybuje od 5 sekund po 35 sekund. Proto je identifikace vybraných

⁵Význam vybraných identifikovaných parametrů: α_{hso} - Součinitel stykového odporu mezi jhem statoru a kostrou, α_{idk} - Součinitel stykového odporu mezi vinutím ve statorové drážce a zubem statoru, $k_{1,\alpha,\text{ko}}$ - Konstanta součinitele přestupu tepla z kostry do okolí, $k_{2,\alpha,\text{ko}}$ - Konstanta součinitele přestupu tepla z kostry do okolí, $k_{1,\alpha,\text{so}}$ - Konstanta součinitele přestupu tepla z ložiskového štítu do okolí, $k_{2,\alpha,\text{so}}$ - Konstanta součinitele přestupu tepla z ložiskového štítu do okolí, $k_{1,\alpha,\text{vvzd}}$ - Konstanta součinitele přestupu tepla z vnitřní částí stroje do vnitřního vzduchu, $k_{2,\alpha,\text{vvzd}}$ - Konstanta součinitele přestupu tepla z vnitřní částí stroje do vnitřního vzduchu, $k_{1,\alpha,\text{cv}}$ - Konstanta součinitele přestupu tepla z čela vinutí statoru do vnitřního vzduchu, $k_{2,\alpha,\text{cv}}$ - Konstanta součinitele přestupu tepla z čela vinutí statoru do vnitřního vzduchu, R_{loz} - Tepelný odpor ložiska.

vstupních parametrů časově náročná.

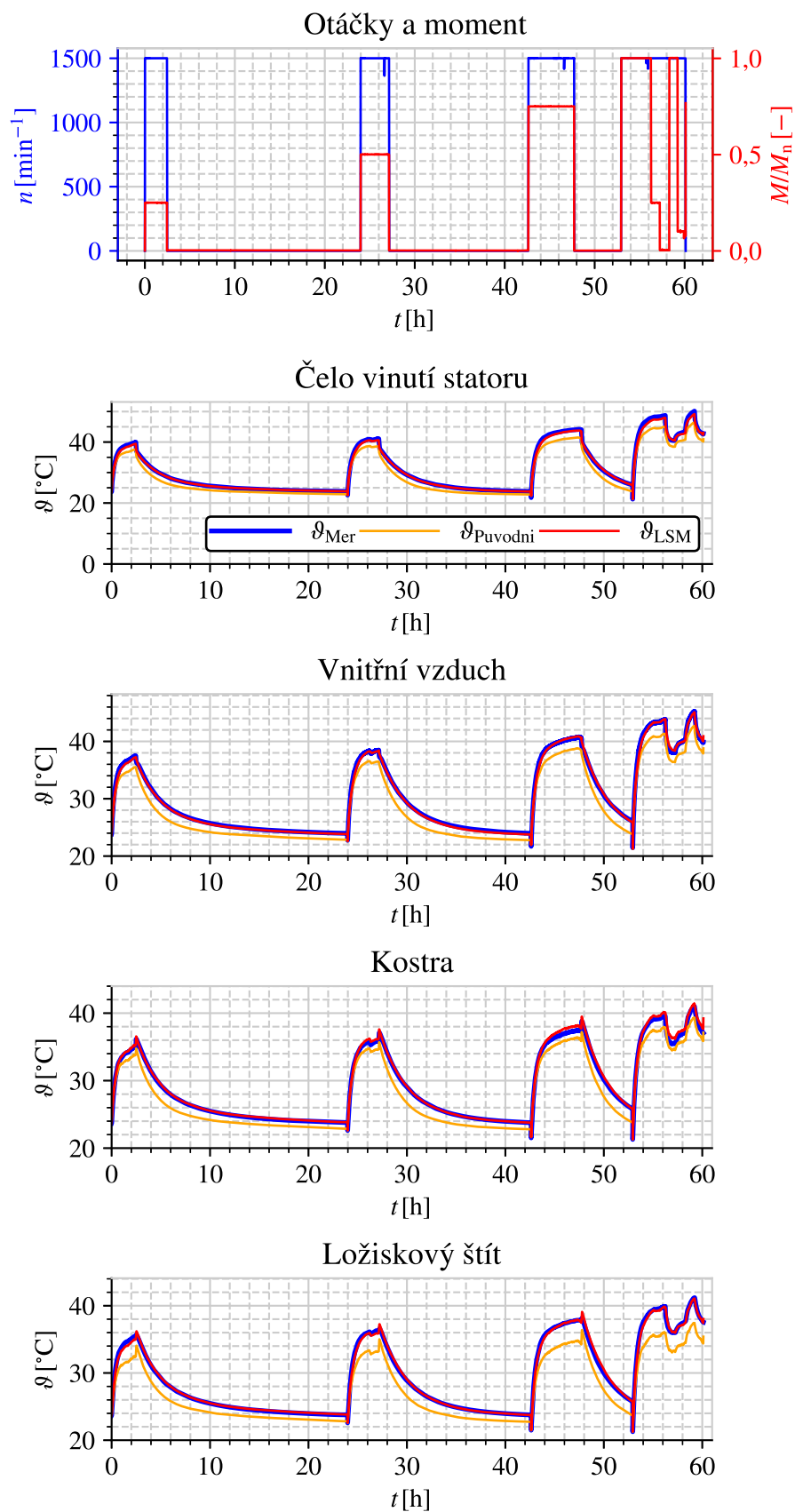
Identifikace parametrů pomocí LSM trvala přibližně 4 hodiny. PSO potřebovala pro identifikaci parametrů přibližně 36 hodin. To je devítinásobně déle než identifikace parametrů metodou LSM. Pravděpodobně by šla identifikace parametrů pomocí PSO urychlit dodatečným nastavením argumentů ve funkci, nicméně tato metoda fungovala dobře i bez jejich nastavení.

4.6 Srovnání změřených oteplovacích charakteristik LSPMSM s oteplovacími charakteristikami přechodného tepelného modelu LSPMSM

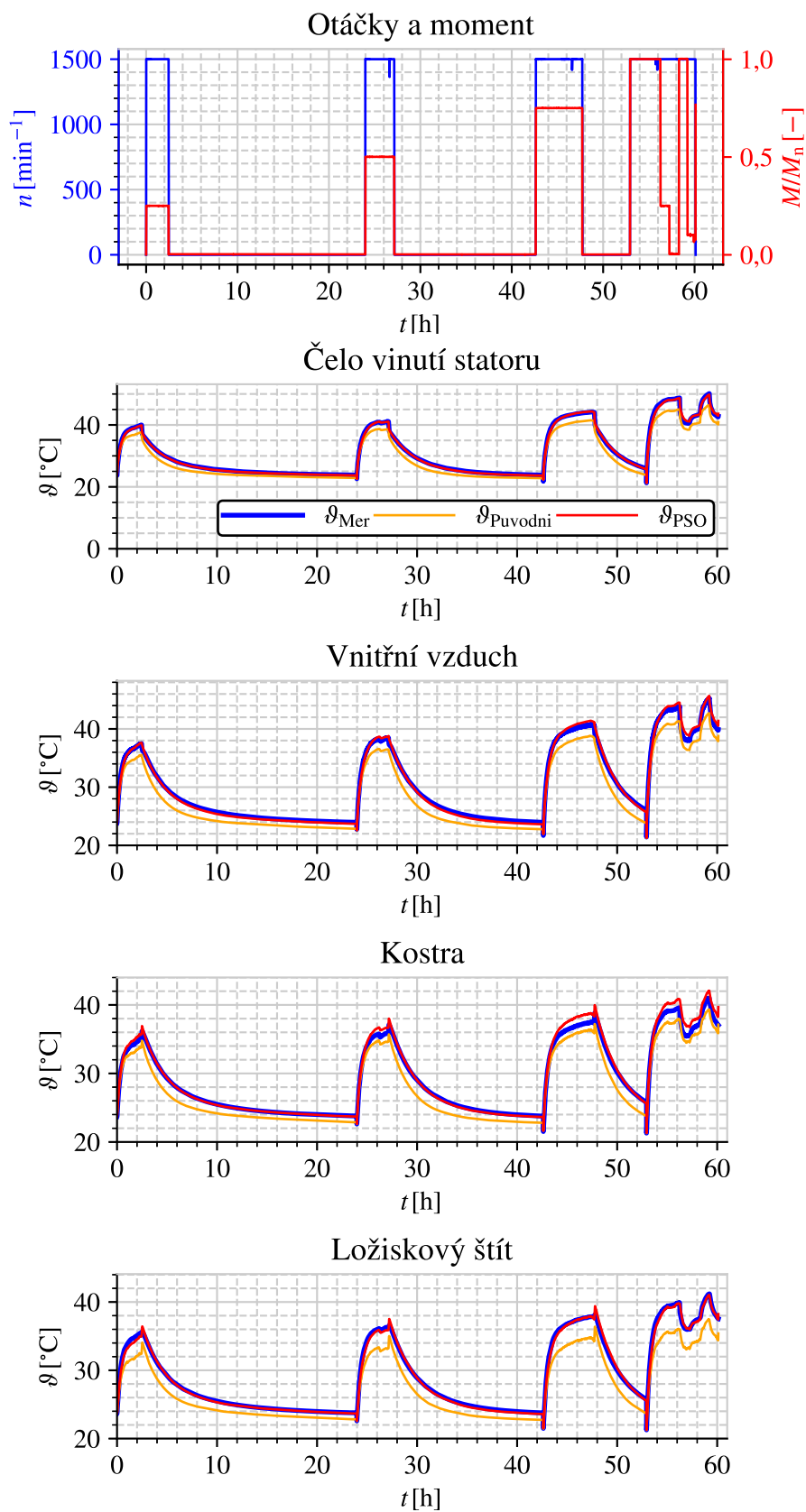
Na Obr. 4.15 je možné vidět srovnání změřených oteplovacích charakteristik LSPMSM s oteplovacími charakteristikami přechodného tepelného modelu LSPMSM řešeného pomocí LSM. Také jsou na Obr. 4.15 uvedeny teplotní průběhy přechodného tepelného modelu LSPMSM před použitím LSM. Totožné srovnání je uvedeno na Obr. 4.16, ale řešení přechodného tepelného modelu LSPMSM je provedeno pomocí PSO.

Do těchto tepelných modelů se zadaly počáteční hodnoty parametrů a následně byly přidány identifikované vybrané vstupní parametry z Tab. 4.3 vypočtené pomocí LSM a PSO. Vlastnosti materiálů zadávaných do tepelných modelů LSPMSM, jako jsou objemové hustoty a měrné tepelné kapacity při konstantním tlaku, jsou uvedeny v příloze A.2. Srovnání je provedeno pro všechny průběhy oteplovacích charakteristik, které byly pro LSPMSM změřeny. Měřená data jsou seřazena od nižších zatěžovacích momentů po jmenovitý zatěžovací moment. Měřené průběhy teplot jsou vyneseny silnými modrými čarami. Vypočtené průběhy teplot s identifikovanými vybranými parametry jsou vyneseny tenčí červenou čarou a vypočtené teploty s počátečními parametry jsou vyneseny tenčí oranžovou čarou.

Jak je možné vidět na srovnáních, měřené a vypočtené průběhy teplot pomocí LSM a PSO dosahují velmi dobré shody u všech měřených částí stroje LSPMSM. K největšímu rozdílu mezi měřenými průběhy teplot a mezi vypočtenými průběhy teplot dochází na kostře LSPMSM, konkrétně je největší rozdíl teplot mezi vypočteným průběhem teploty kostry pomocí PSO a mezi změřeným průběhem teploty kostry. Tento rozdíl činí přibližně 1,5 Kelvinu. Celkově dosahuje LSM lepší shody s měřenými průběhy než PSO.



Obr. 4.15: Porovnání změřených oteplovacích charakteristik LSPMSM s oteplovacími charakteristikami přechodného tepelného modelu řešeného pomocí LSM.



Obr. 4.16: Porovnání změřených oteplovacích charakteristik LSPMSM s oteplovacími charakteristikami přechodného tepelného modelu řešeného pomocí PSO.

5 Srovnání tepelného modelu se simulacemi v softwaru Ansys Workbench

Tato kapitola se zabývá srovnáním tepelného modelu LSPMSM se simulacemi v softwaru Ansys Workbench. Nejdříve se zde nachází ověření částí tepelného modelu pomocí konečnoprvkových tepelných modelů statorového paketu a rotoru LSPMSM v ustáleném stavu.

Druhá část této kapitoly se věnuje tvorbě automatické parametrické geometrie, která je řízena pomocí programovacího jazyka Python. Následně jsou parametrické geometrie spojeny a upraveny do podoby geometrického modelu celého stroje. Dále se zde nachází řešení konečnoprvkového tepelného modelu LSPMSM.

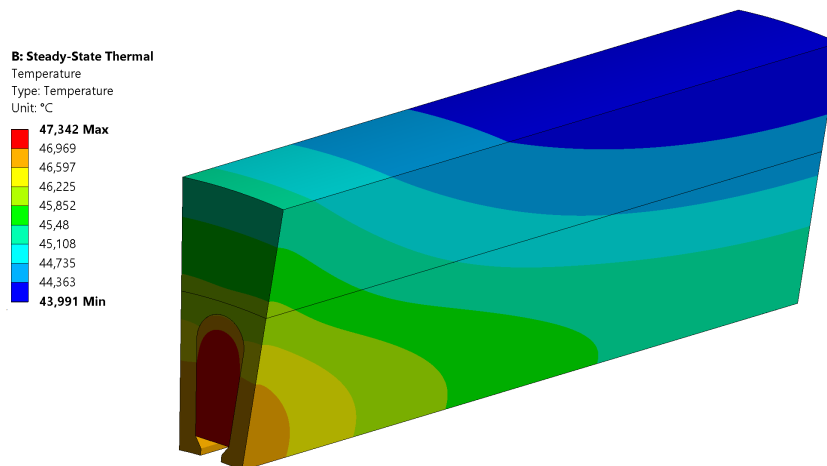
Na konci této kapitoly je uvedeno srovnání přechodného tepelného modelu s konečnoprvkovým tepelným modelem LSPMSM. Dále je toto srovnání pro úplnost doplněno o oteplovací charakteristiky z měření.

5.1 Ověření dílčích částí tepelného modelu simulacemi v softwaru Ansys Workbench

Pro ověření přesnosti tepelného modelu v ustáleném stavu byly jeho části porovnány s konečnoprvkovými teplotními modely statorového paketu a rotoru LSPMSM.

5.1.1 Teplotní pole vypočtené pomocí konečnoprvkového tepelného modelu statorového paketu LSPMSM

Na Obr. 5.1 je zobrazeno teplotní pole vypočtené pomocí konečnoprvkového tepelného modelu statorového paketu LSPMSM v ustáleném stavu. Při předpokladu symetrického rozložení teplot v tangenciálním směru je možné místo celého modelu statorového paketu uvažovat pouze výseč s úhlem výseče poloviny drážky. V případě na Obr. 5.1 je zobrazena výseč jedné drážky statorového paketu. Rozložení teplot přibližně odpovídá jmenovitým podmínkám ve stroji. V Tab. 5.1 jsou uvedeny okrajové podmínky pro konečnoprvkový tepelný model statorového paketu LSPMSM použitého pro ověření funkčnosti tepelného modelu LSPMSM při ustáleném stavu.



Obr. 5.1: Teplotní pole vypočtené pomocí konečnoprvkového tepelného modelu statorového paketu LSPMSM v ustáleném stavu.

Tab. 5.1: Okrajové podmínky pro konečnoprvkový tepelný model statorového paketu LSPMSM použité pro ověření funkčnosti tepelného modelu LSPMSM při ustáleném stavu.

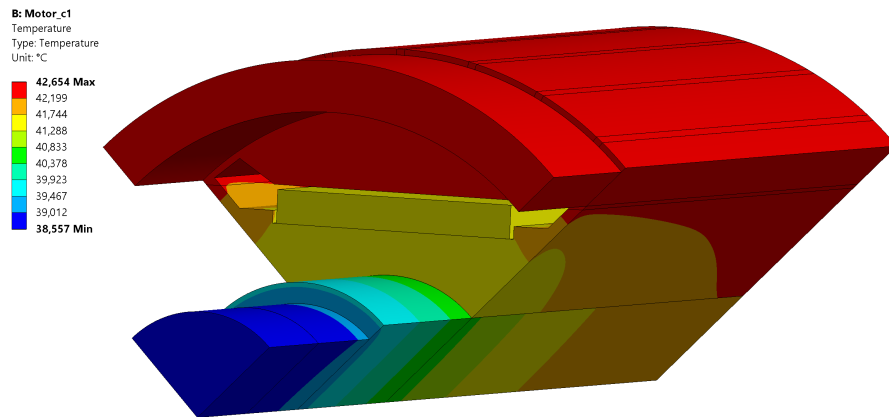
Symbol	Popis	Hodnota	Jednotka
α_{hso}	Spt. ¹ na povrchu jha statorového paketu	600	
α_{Del}	Spt. do vzduchové mezery	200	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$
$\alpha_{\text{Fes,vzd}}$	Spt. ze jha statorového paketu do vnitřního vzduchu	20	
ϑ_{hso}	Teplota na povrchu jha statorového paketu	35	
ϑ_{Del}	Teplota ve vzduchové mezeře	45	°C
ϑ_{vzd}	Teplota vnitřního vzduchu	45	
ΔP_{j1}	Ztráty v drážce statorového paketu	20	
ΔP_{zs}	Ztráty v zubu statorového paketu	15	W
ΔP_{js}	Ztráty ve jhu statorového paketu	10	

5.1.2 Teplotní pole vypočtené pomocí konečnoprvkového tepelného modelu rotoru LSPMSM

Na Obr. 5.2 se nachází teplotní pole vypočtené pomocí konečnoprvkového tepelného modelu rotoru LSPMSM v ustáleném stavu. Stejně tak jako u teplotního pole statorového paketu LSPMSM je teplotní pole rotoru LSPMSM upraveno do podoby výseče s úhlem výseče jedné drážky pro permanentní magnet. V Tab. 5.2 jsou

¹Spt. je zkratka pro součinitele přestupu tepla.

uvedeny okrajové podmínky pro teplotní pole rotoru LSPMSM použité pro ověření funkčnosti tepelného modelu LSPMSM při ustáleném stavu.



Obr. 5.2: Teplotní pole vypočtené pomocí konečnoprvkového tepelného modelu rotoru LSPMSM v ustáleném stavu.

Tab. 5.2: Okrajové podmínky pro konečnoprvkový tepelný model rotoru použité pro ověření funkčnosti tepelného modelu LSPMSM v ustáleném stavu.

Symbol	Popis	Hodnota	Jednotka
α_{krr}	Spt. z kruhu rotoru do vnitřního vzduchu v radiálním směru	14	
α_{kra}	Spt. z kruhu rotoru do vnitřního vzduchu v axiálním směru	14	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$
$\alpha_{Fer,vzd}$	Spt. ze jha rotoru do vnitřního vzduchu	14	
α_{hvv}	Spt. z hřídele do vnitřního vzduchu	10	
α_{hnr}	Spt. z hřídele do okolního vzduchu	10	
α_{loz}	Spt. z hřídele do ložiska	700	
α_{Del}	Spt. do vzduchové mezery	200	
ϑ_{vzd}	Teplota vnitřního vzduchu	44	
ϑ_o	Teplota okolního vzduchu	20	$^{\circ}C$
ϑ_{loz}	Teplota na povrchu ložiska	35	
ϑ_{Del}	Teplota ve vzduchové mezeře	43	

5.1.3 Porovnání tepelného modelu LSPMSM s konečnoprvkovými teplotními poli vytvořenými v programu Ansys Workbench

Z Tab. 5.3 vyplývá, že se střední teploty tepelného modelu LSPMSM v ustáleném stavu téměř zcela shodují se středními teplotami konečnoprvkového tepelného modelu statorového paketu a rotoru LSPMSM. Číslování uzlů v Tab. 5.3 odpovídá uzlům na Obr. 4.1. K největšímu rozdílu středních teplot dochází v uzlu číslo 12, tento uzel se nachází v oblasti ložiska. Tepelný model LSPMSM je s největší pravděpodobností správně navržen, protože jsou rozdíly středních teplot v absolutní hodnotě v Tab. 5.3 s maximálním rozdílem půl Kelvinu. Dále se bude přesnost celého tepelného modelu LSPMSM ověřovat pomocí přechodného tepelného modelu LSPMSM v programu Ansys Workbench a měřeními.

Tab. 5.3: Porovnání tepelného modelu LSPMSM s konečnoprvkovými teplotními poli vytvořenými v programu Ansys Workbench.

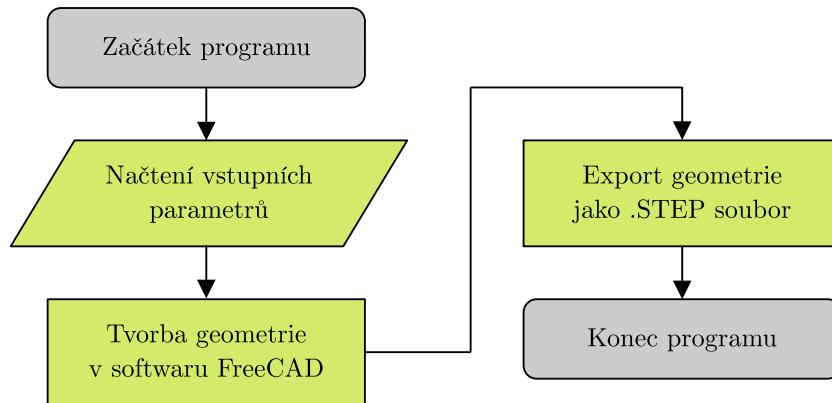
Uzel	Ansyes	Sít	Rozdíly teplot
	$\vartheta_{\text{Ans}} [^{\circ}\text{C}]$	$\vartheta_{\text{Sít}} [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta\vartheta [\text{K}]$
2	44,04	44,09	0,05
3	43,64	43,30	0,34
4	42,77	42,78	0,01
7	42,61	42,72	0,11
8	42,59	42,69	0,10
9	42,59	42,66	0,07
10	41,96	42,15	0,20
11	41,97	42,05	0,08
12	38,70	39,14	0,44
13	40,02	40,44	0,42
14	41,64	41,57	0,07

5.2 Ověření přechodného tepelného modelu LSPMSM simulacemi v programu Ansys Workbench

Tato část je věnována tvorbě a nastavení funkčnosti tepelného modelu LSPMSM v přechodném stavu. Přechodným stavem se myslí změna teplot tepelného modelu LSPMSM v závislosti na čase. Tepelná analýza LSPMSM byla vytvořena v programu Ansys Workbench. Vstupní data byla pro přechodnou analýzu vytvořena v programovacím jazyku Python v prostředí PyCharm.

5.2.1 Tvorba geometrického modelu LSPMSM

Pro rychlejší tvorbu dílčích částí geometrických modelů, jako je statorový paket a rotor, byl vytvořen program v jazyce Python. Tento program spouští software FreeCAD přes příkaz *subproces*. Pro správnou funkci tohoto programu je nutná verze 0.18.3 softwaru FreeCAD a Python ve verzi 3.6.0 [36, 37]. Algoritmus pro tvorbu parametrické geometrie je zobrazen na Obr. 5.3.

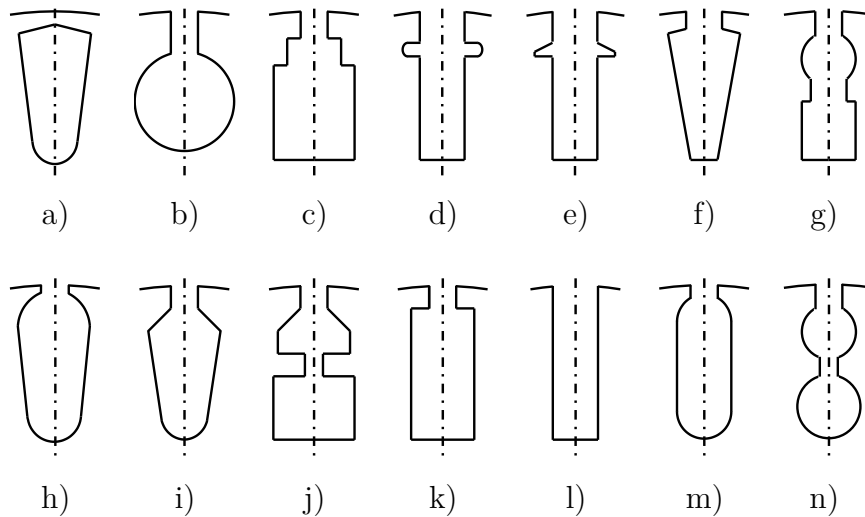


Obr. 5.3: Algoritmus pro tvorbu parametrické geometrie.

Nejdříve se načtou vstupní proměnné jako jsou rozměry a nastavení geometrie do Pythonu. Následující posloupnost akcí vytvoří parametrický geometrický model pomocí sady příkazů, do nichž například patří *pocket*, *extrusion*, *line segment* nebo *circle*. Seznam příkazů se nachází přímo v softwaru FreeCAD. Pro větší kompatibilitu mezi modelovacími programy se vytvořená parametrická geometrie exportuje ve formátu STEP². Po této sekvenci je program ukončen.

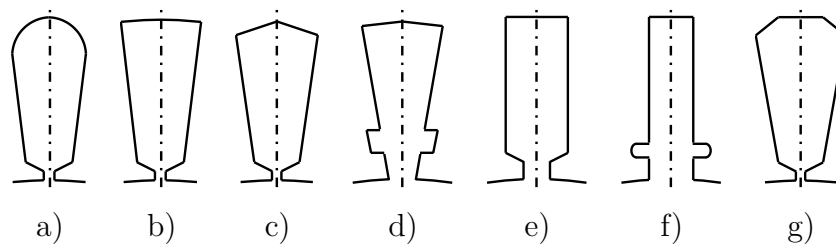
Pro větší univerzálnost programu na tvorbu parametrických geometrií bylo celkem implementováno 14 typů rotorových drážek a 7 typů statorových drážek. Implementované typy rotorových drážek jsou zobrazeny na Obr. 5.4 a) až n). Implementované typy statorových drážek jsou zobrazeny na Obr. 5.5 a) až g).

²STEP je zkratka pro Standard for the Exchange of Product Data. Je to standardizovaný formát pro sdílení a úpravu trojrozměrných modelů [38].



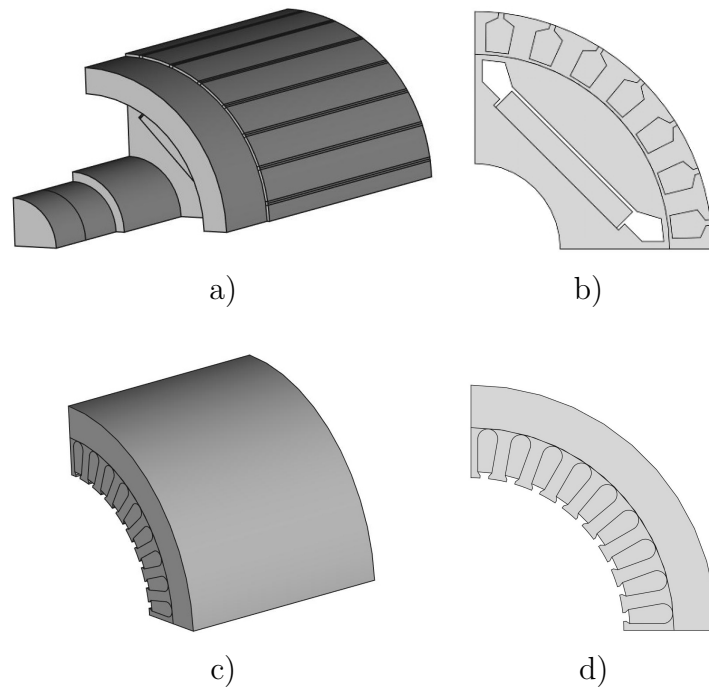
Obr. 5.4: Typy rotorových drážek.

Počet drážek modelů může být libovolně měněn. Všechny typy drážek jsou plně parametrické.



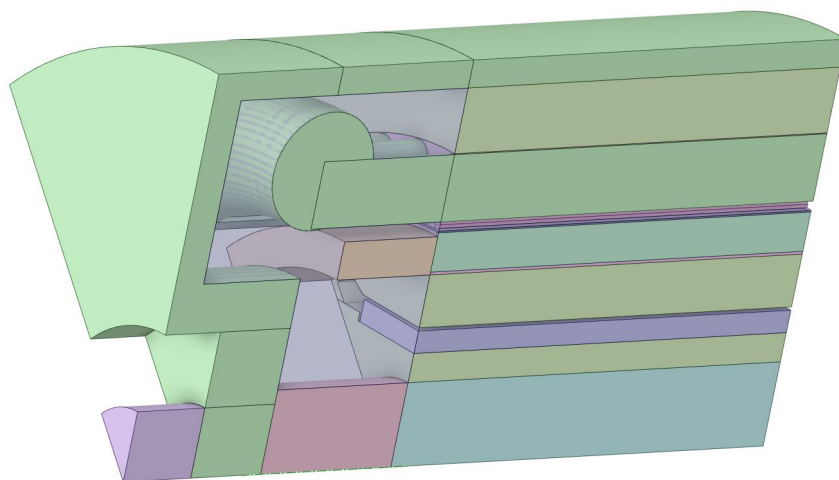
Obr. 5.5: Typy statorových drážek.

Na Obr. 5.6 a) až d) se nachází automatizovaně vytvořené geometrické modely pro simulaci v softwaru Ansys Workbench. Dále byly tyto automatizovaně vytvořené geometrické modely exportovány do modelovacího programu SpaceClaim integrovaného v programu Ansys Workbench. V tomto programu byly vytvořené geometrické modely vloženy do jednoho souboru a následně upraveny. Konkrétně byla vytvořena kostra v podobě válcového mezikruží, dále bylo přidáno čelo vinutí statorového paketu a také byl vytvořen ložiskový štít s ložiskem. Nakonec se pomocí funkce *enclosure* vytvořil vnitřní vzduch ve stroji.



Obr. 5.6: Geometrické modely rotoru a statoru LSPMSM, a) Geometrický model rotoru LSPMSM, b) Čelní pohled geometrického modelu rotoru LSPMSM, c) Geometrický model statoru LSPMSM, d) Čelní pohled geometrického modelu statoru LSPMSM.

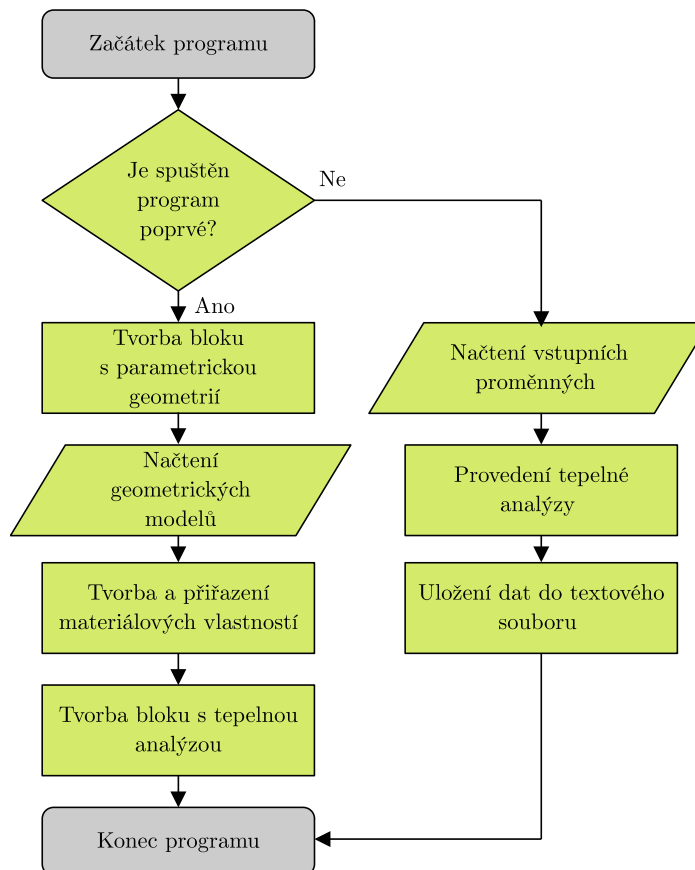
Kvůli velmi vysokým požadavkům na výpočet přechodné tepelné analýzy byl geometrický model upraven do jedné šestnáctiny objemu původního stroje, tedy je analyzována pouze polovina drážky magnetu v rotoru v radiálním směru. Na Obr. 5.7 je znázorněn připravený geometrický model LSPMSM pro tepelnou analýzu v softwaru Ansys Workbench.



Obr. 5.7: Geometrický model LSPMSM.

5.2.2 Konečnoprvkové teplotní pole LSPMSM

Konečnoprvková tepelná analýza LSPMSM slouží pro ověření funkčnosti tepelného modelu LSPMSM v přechodném stavu. Příprava a řešení konečnoprvkové tepelné analýzy LSPMSM bylo pro snadnější používání značně automatizováno pomocí programu vytvořeném v softwaru Python. Tento program řídí přes příkaz *subproces* software Ansys Workbench. Algoritmus tohoto programu je znázorněn na Obr. 5.8.



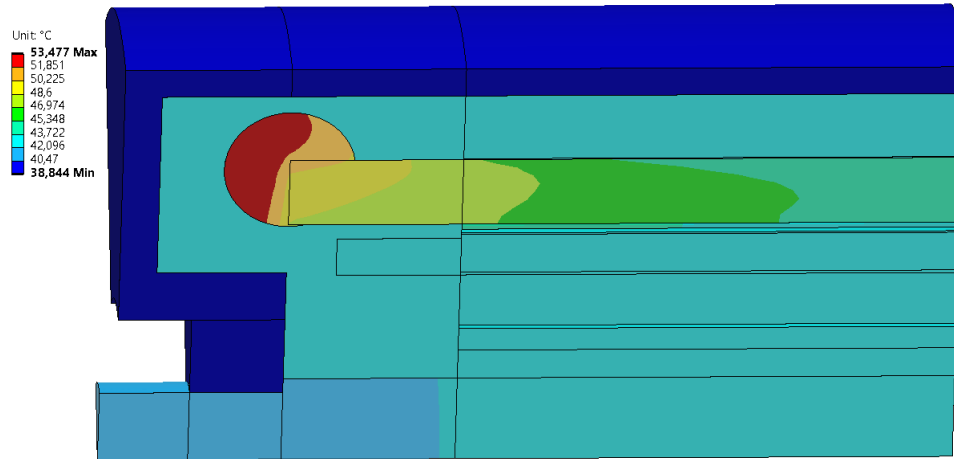
Obr. 5.8: Algoritmus pro tvorbu a výpočet konečnoprvkového teplotního pole LSPMSM.

Algoritmus se skládá ze dvou větví. Výběr mezi těmito větvemi je zajišťován podmínkou. Pravá větev představuje posloupnost výpočtu tepelné analýzy a levou větev tvoří tvorba konečnoprvkové tepelné analýzy LSPMSM.

Levá větev, tedy tvorba jednotlivých bloků v softwaru Ansys Workbench, je provedena z velké části automatizovaně. Pravá větev je zcela automatizována. Výsledné teplotní pole LSPMSM v určitém časovém okamžiku při jmenovitém zatížení se nachází na Obr. 5.9

Vstupní parametry jako součinitelé přestupu tepla, měrné tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacity při konstantním tlaku a objemové hustoty byly zadány

do konečnoprvkové tepelné analýzy LSPMSM. Tyto hodnoty se nachází v příloze A.2. Ztráty ve vinutí jsou spočteny z proudu a odporu vinutí závislého na teplotě. Na Obr. 5.9 je zobrazeno vypočtené teplotní pole LSPMSM v určitém časovém okamžiku při jmenovitém zatížení.



Obr. 5.9: Vypočtené teplotní pole LSPMSM v určitém časovém okamžiku při jmenovitém zatížení.

5.3 Porovnání změřených oteplovacích charakteristik LSPMSM se simulacemi v programu Ansys Workbench

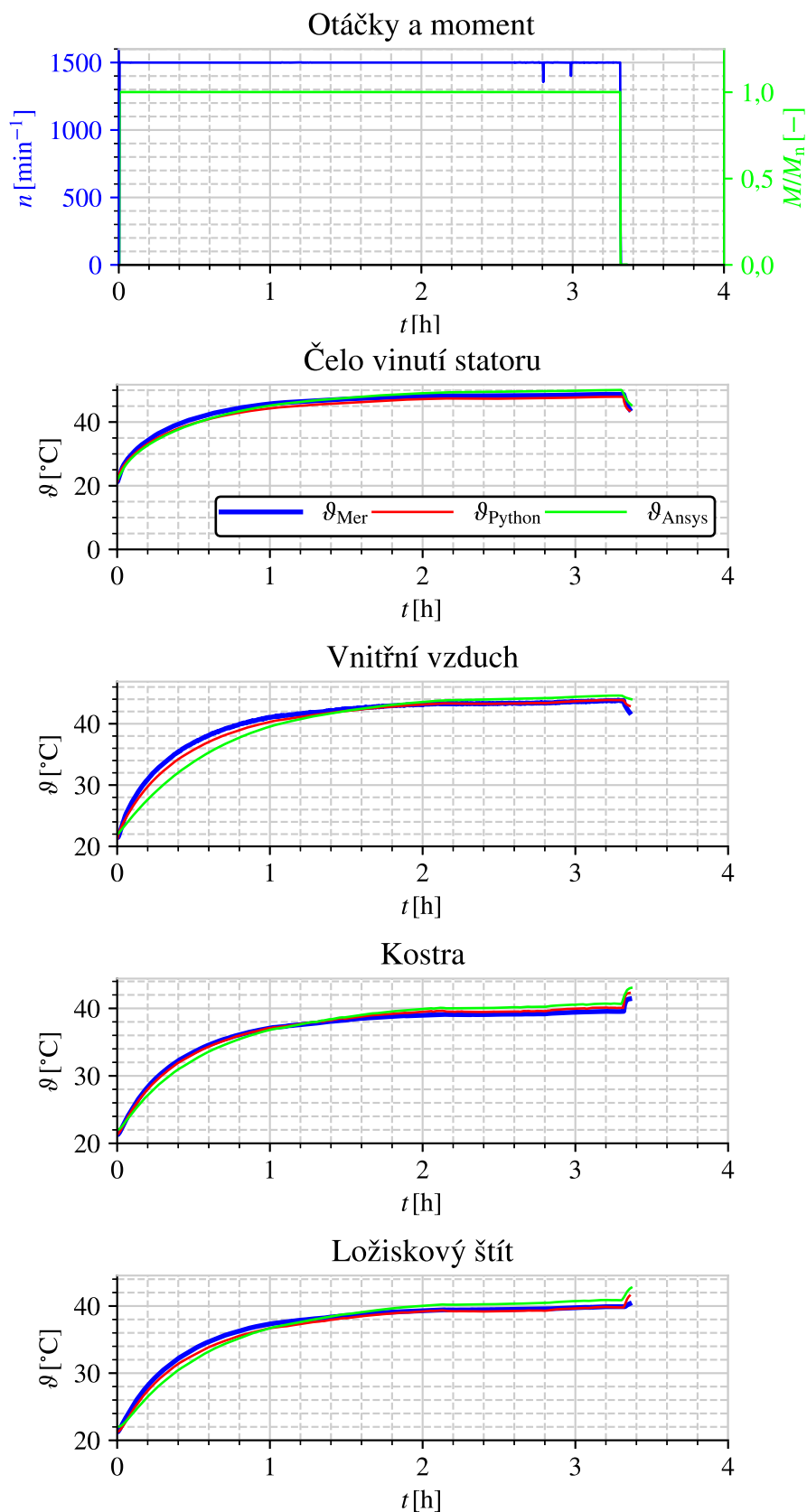
Pro ověření přesnosti oteplovacích charakteristik důležitých částí stroje přechodného tepelného modelu LSPMSM byly tyto průběhy srovnány jak s oteplovacími charakteristikami konečnoprvkového tepelného modelu, tak s měřenými průběhy teplot. Srovnání oteplovacích charakteristik důležitých částí stroje při jmenovitém zatížení je uvedeno na Obr. 5.10. Totožné srovnání je na Obr. 5.11 uvedeno pro všechny průběhy oteplovacích charakteristik, které byly pro LSPMSM změřeny.

Srovnání měřených, vypočtených a simulovaných teplot je provedeno pro čelo vinutí statoru, teplotu vnitřního vzduchu ve stroji, teplotu kostry a teplotu ložiskového štítu na straně hřídele. Měřené průběhy teplot jsou značeny modrou silnější čarou, červené průběhy reprezentují přechodný tepelný model a světle zelené průběhy představují teploty konečnoprvkového tepelného modelu.

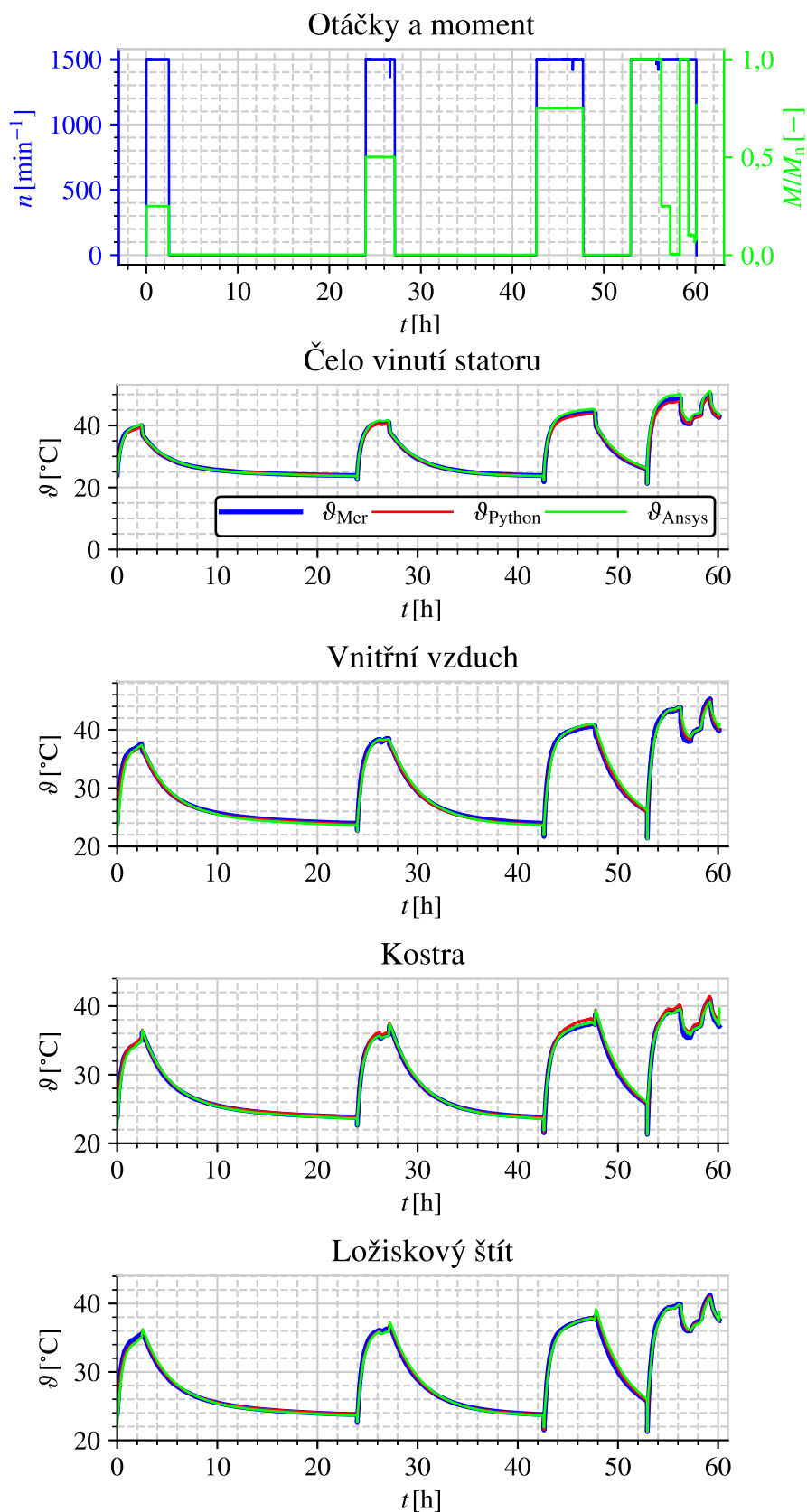
Srovnání oteplovacích charakteristik mezi přechodným tepelným modelem a konečnoprvkovým tepelným modelem při jmenovitém zatížení je uvedeno v příloze B.1. Stejně srovnání pro všechna měření jsou uvedena v příloze B.2.

Celkový čas výpočtu konečnoprvkového tepelného modelu při jmenovitém zatížení byl 4 hodiny, pro všechny změřené průběhy trval výpočet konečnoprvkového tepelného modelu 70 hodin.

Jak je možné z teplotních průběhů na obrázcích níže vidět, průběhy teplot v jednotlivých částech stroje obou modelů dosahují velmi dobré shody s měřenými průběhy teplot. Přechodný teplotní model LSPMSM je nejspíše správně navržen.



Obr. 5.10: Srovnání oteplovacích charakteristik důležitých částí stroje přechodného tepelného modelu LSPMSM s konečnoprvkovým tepelným modelem LSPMSM a s měřením při jmenovitém zatížení.



Obr. 5.11: Srovnání oteplovacích charakteristik důležitých částí stroje přechodného tepelného modelu LSPMSM s konečnoprvkovým tepelným modelem LSPMSM a s měřením.

Závěr

Jedním z cílů této práce bylo vytvořit řešerši v oblasti konstrukce synchronních strojů spouštěných ze sítě, zkráceně LSPMSM. Tato část je uvedena na začátku této práce. Dále jsou v práci uvedeny mechanismy přenosu tepla, analogie mezi elektrickými a tepelnými veličinami a je zde věnována pozornost problematice tepelných sítí. Tento celek se nachází ve druhé části práce. Ve třetí části jsou uvedeny vztahy pro výpočty tepelných odporů a jsou zde také uvedeny vztahy součinitelů přestupu tepla v různých částech stroje. Dále je zde uveden přehled fyzikálních vlastností běžně používaných materiálů pro tepelné výpočty elektrických strojů. Nahrazení dvou materiálů o různých měrných tepelných vodivostech ekvivalentní měrnou tepelnou vodivostí je uvedeno v poslední sekci tohoto celku.

Na začátku čtvrté části je tepelný model LSPMSM blíže popsán. Je provedeno osazení teplotními čidly laboratorního vzorku synchronního stroje s přímým připojením na síť. Dále je přiblíženo měřicí stanoviště a jsou uvedeny výsledky měření. Také jsou zde uvedeny metody pro identifikaci určených vstupních parametrů tepelného modelu LSPMSM, počáteční hodnoty a hranice pro identifikované vybrané vstupní parametry pro tepelný model LSPMSM v čteně výsledků identifikovaných parametrů. Přechodný tepelný model LSPMSM s dosazenými identifikovanými vybranými vstupními parametry je porovnán s výsledky měření.

Na konci této práce jsou uvedeny části tepelného modelu LSPMSM, které jsou porovnány s konečnoprvkovými tepelnými modely LSPMSM vytvořenými v softwaru Ansys Workbench v ustáleném stavu. Dále je blíže popsána dílčí tvorba částí automatizovaných parametrických geometrií. Následně je vytvořen konečnoprvkový tepelný model LSPMSM v softwaru Ansys Workbench v přechodném stavu. Střední teploty tohoto přechodného konečnoprvkového tepelného modelu jsou porovnány se středními teplotami tepelného modelu LSPMSM.

Pro tvorbu tepelného modelu LSPMSM byly nejdříve určeny vstupní hodnoty, jako jsou geometrické rozměry, tepelné ztráty, okrajové podmínky v podobě vstupních teplot a součinitelů přestupu tepla a materiálové vlastnosti. Měření bylo provedeno na laboratorním vzorku LSPMSM. Výsledky oteplovacích charakteristik pro různé zatěžovací momenty jsou uvedeny na Obr. 4.12. Dále byly vybrané vstupní parametry identifikovány na základě minimalizačních metod, viz Tab. 4.3.

Porovnání měřených oteplovacích charakteristik laboratorního vzorku LSPMSM s přechodným tepelným modelem LSPMSM s dosazenými vstupními identifikovanými parametry je zobrazeno na Obr. 4.15. Totožné srovnání pro vstupní identifikované parametry jinou minimalizační metodou je uvedeno na Obr. 4.16. Přechodný model LSPMSM je pravděpodobně správně navržen, protože se oteplovací charakteristiky LSPMSM shodují s měřenými oteplovacími charakteristikami laboratorního

vzorku LSPMSM.

Pro další ověření tepelného modelu LSPMSM byly porovnány střední teploty tepelného modelu LSPMSM v ustáleném stavu s konečnoprvkovými modely LSPMSM vytvořenými v softwaru Ansys Workbench. Výsledné porovnání středních teplot se nachází v Tab. 5.3. Výsledky naznačují, že je tepelný model LSPMSM vhodně navržen, protože se střední teploty tepelného modelu LSPMSM dosahují dobré shody s konečnoprvkovými modely statorového paketu a rotoru LSPMSM.

Přesnost tepelného modelu LSPMSM byla dodatečně ověřena oteplovacími charakteristikami přechodného konečnoprvkového tepelného modelu vytvořeného v softwaru Ansys Workbench při jmenovitém zatížení, viz Obr. 5.10. Dále bylo provedeno totožné srovnání pro všechny změřené oteplovací charakteristiky, viz Obr. 5.11. Průběhy na obrázcích se ve velké míře shodují, nicméně nejlepší shody tepelného modelu s konečnoprvkovým modelem je dosaženo na Obr. 5.11. Je možné říci, že tepelný model LSPMSM je vhodně navržen a dosahuje s měřením a se simulacemi velmi dobré shody.

Literatura

- [1] Jan Bárta. Návrh elektrického stroje 6kw, 120 000 ot/min pro turbocirkulátor hélia. Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Brno, 2017.
- [2] Youn-Hwan Kim, Hee-Deuk Jun, Jae-Won Moon, Rae-Eun Kim, Se-Hyun Rhyu, and Sang-Young Jung. Motor efficiency determination of synrm and measurement uncertainty. pages 233–239, 2019. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9007174/>, doi:10.1109/ACEMP-OPTIM44294.2019.9007174.
- [3] Berkan Zöhra, Mehmet Akar, and Mustafa Eker. Design of a novel line start synchronous motor rotor. *Electronics*, 8(1):1–18, 2019. URL: <http://www.mdpi.com/2079-9292/8/1/25>, doi:10.3390/electronics8010025.
- [4] L.O. Kaser. Mational electrical manufacturers association flexible insulation and mica section (6-fi). In *Proceedings:Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference*, pages 545–546, Rosemont, IL, USA, 1995. Electr. Manuf. & Coil Winding Assoc. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/482491/>, doi:10.1109/EEIC.1995.482491.
- [5] Rajendra Mistry, William R Finley, and Tyler Gaerke. Comparison of iec and nema requirements to ensure proper specification and design of induction motors & generators for global use. *2017 Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC)*, pages 35–44, 2017. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8188611/>, doi:10.1109/PCICON.2017.8188611.
- [6] Robbie McElveen, Jani Korkeakoski, and John Malinowski. Electrical and mechanical differences between nema/ieee and iec ac low voltage random wound induction motors. In *2012 Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC)*, pages 1–10, New Orleans, LA, USA, 2012. IEEE. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6549685/>, doi:10.1109/PCICON.2012.6549685.
- [7] ČSN EN 60034-30-1 Točivé elektrické stroje –Část 30-1: Třídy účinnosti střídavých motorů provozovaných ze sítě (IE kód). Praha, 2014.
- [8] K.J Binns and W.R Barnard. Novel design of selfstrating synchronous motor. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineering*, 118(2), 1971.
- [9] Peer-Ole Gronwald and Thorsten A. Kern. Traction motor cooling systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 7(4):2892–2913,

2021. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9416502/>, doi:10.1109/TTE.2021.3075844.
- [10] Vera Elistratova. Optimal design of line-start permanent magnet synchronous motors of high efficiency. Master's thesis, Ecole Centrale de Lille, 2015. URL: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01308575/document>.
- [11] Bui Minh Dinh and Ho Manh Tien. Maximum efficiency design of line start permanent magnet synchronous motor. *2016 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)*, pages 350–354, 2016. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7811808/>, doi:10.1109/ICSET.2016.7811808.
- [12] Yunus A. Cengel and Afshin J. Ghajar. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Education, New York, vyd. 5 edition, 2015.
- [13] Juha Pyrhönen, Tapani Jokinen, and Valéria Hrabovcová. *Design of rotating electrical machines*. Wiley, Chichester, 2nd ed edition, 2014.
- [14] Miroslav Patočka. *Vybrané statě z výkonové elektroniky*. Zdeněk Novotný, Brno, vyd. 3 edition, 2004.
- [15] Radek Vlach. *Tepelné procesy v mechatronických soustavách*, 2009.
- [16] Marek Toman. Thermal model of induction machine and its practical verification. In *Proceedings of the 22 nd Conference STUDENT EEICT 2016*, pages 497–501, Brno, 2016. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [17] Marek Toman, Radoslav Cipin, and Pavel Vorel. 18th international conference on mechatronics - mechatronika (me). pages 1–6. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8624804>.
- [18] P.H. Mellor, D. Roberts, and D.R. Turner. Lumped parameter thermal model for electrical machines of tefc design. *IEE Proceedings B Electric Power Applications*, 138(5):205 – 218, 1991. URL: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-b.1991.0025>, doi:10.1049/ip-b.1991.0025.
- [19] Daniel Wockinger, Gerd Bramerdorfer, Stephan Drexler, Silvio Vaschetto, Andrea Cavagnino, Alberto Tenconi, Wolfgang Amrhein, and Frank Jeske. Measurement-based optimization of thermal networks for temperature monitoring of outer rotor pm machines. *2020 IEEE Energy Conversion Congress*

- and Exposition (ECCE)*, pages 4261–4268, 2020. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9236388/>, doi:10.1109/ECCE44975.2020.9236388.
- [20] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, and M. Pastorelli. A simplified thermal model for variable-speed self-cooled industrial induction motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39(4):945–952, 2003. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1215422/>, doi:10.1109/TIA.2003.814555.
- [21] Björn Andersson. Lumped parameter thermal modelling of electric machines. Diplomová práce, Chalmers university of technology, Department of energy and environment, Göteborg, 2013. URL: <https://odr.chalmers.se/bitstream/20.500.12380/185192/1/185192.pdf>.
- [22] Aldo Boglietti and Andrea Cavagnino. Analysis of the endwinding cooling effects in tefc induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 43(5):1214–1222, 2007. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4305309/>, doi:10.1109/TIA.2007.904399.
- [23] Gareth Gilson, S. J. Pickering, D. B. Hann, and C. Gerada. Analysis of the end winding heat transfer variation with altitude in electric motors. *35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, pages 2545–2550, 2009. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5415243/>, doi:10.1109/IECON.2009.5415243.
- [24] Aldo Boglietti, Andrea Cavagnino, David A. Staton, Mircea Popescu, Calum Cossar, and Malcolm I. McGilp. End space heat transfer coefficient determination for different induction motor enclosure types. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45(3):929–937, 2009. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4957502/>, doi:10.1109/TIA.2009.2018967.
- [25] Martin Hettegger, Bernhard Streibl, Oszkar Biro, and Harald Neudorfer. Identifying the heat transfer coefficients on the end-windings of an electrical machine by measurements and simulations. *The International Conference on Electrical Machines - ICEM*, (XIX):1–5. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5608250/>, doi:10.1109/ICELMACH.2010.5608250.
- [26] Marek Toman. Výpočet optimálního magnetického toku asynchronního motoru pro minimalizaci ztrát se zohledněním teplotních vlivů. Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, Brno, 2022. URL: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/143130>.

- [27] Georgios D. Demetriades, Hector Zelaya de la Parra, Erik Andersson, and Hakan Olsson. A real-time thermal model of a permanent-magnet synchronous motor. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(2):463–474, 2010. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5204128/>, doi:10.1109/TPEL.2009.2027905.
- [28] M. Anibal Valenzuela and Juan A. Tapia. Heat transfer and thermal design of finned frames for tefc variable speed motors. In *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, pages 4835–4840. IEEE, 2006. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4153673/>, doi:10.1109/IECON.2006.348149.
- [29] Aldo Boglietti, Andrea Cavagnino, and David Staton. Determination of critical parameters in electrical machine thermal models. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 44(4):1150–1159, 2008. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4578771/>, doi:10.1109/TIA.2008.926233.
- [30] Electrical steel strip grades and coating systems, 2019. URL: <https://www.waelzholz.com/fileadmin/Website-EN/Documents/Brochures/waelzholz-electrical-steel-strip-2019-10-en.pdf>.
- [31] Nick Simpson, Rafal Wrobel, and Phil H. Mellor. Estimation of equivalent thermal parameters of impregnated electrical windings. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(6):2505–2515, 2013. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6516549/>, doi:10.1109/TIA.2013.2263271.
- [32] Marek Toman. Analysis of equivalent thermal conductivity of winding using fem-based model. In *Proceedings I of the 27th Conference STUDENT EEICT 2021*, volume 27th, pages 544–548, Brno, 2021. Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication. URL: <https://www.eeict.cz/download>.
- [33] Laïd Idoughi, Xavier Mininger, Frédéric Bouillault, Laurent Bernard, and Emmanuel Hoang. Thermal model with winding homogenization and fit discretization for stator slot. *IEEE Transactions on Magnetics*, 47(12):4822–4826, 2011. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5871721/>, doi:10.1109/TMAG.2011.2159013.
- [34] Marek Toman, Radoslav Cipin, Pavel Vorel, and Martin Mach. Algorithm for im optimal flux determination respecting nonlinearities and thermal influences. In *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC*

- / *I&CPS Europe*), pages 1–5, Italy, 2018. IEEE. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8493953/>, doi:10.1109/EEEIC.2018.8493953.
- [35] Haipeng Liu, Sabrina Ayat, Rafal Wrobel, and Chengning Zhang. Comparative study of thermal properties of electrical windings impregnated with alternative varnish materials. *The Journal of Engineering*, 2019(17):3736–3741, 2019. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/joe.2018.8198>, doi:10.1049/joe.2018.8198.
- [36] *FreeCAD 0.18.3*, 2019. URL: <https://github.com/FreeCAD/FreeCAD/releases/tag/0.18.3>.
- [37] *Python 3.6.0*, 2016. URL: <https://www.python.org/downloads/release/python-360/>.
- [38] Bitla Venu and Venkateswara Rao Komma. Some heuristics of helical sweep surfaces in iso 10303 step ap203 file to identify threaded features. In *2017 International Conference on Advances in Mechanical, Industrial, Automation and Management Systems (AMIAMS)*, pages 291–295, India, 2017. IEEE. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8069227/>, doi:10.1109/AMIAMS.2017.8069227.
- [39] Datasheet k teplotnímu senzoru kty84. URL: https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/KTY84_SER.pdf.
- [40] Datasheet k teplotnímu senzoru pt1000. URL: <https://www.tme.eu/cz/details/tt-pt1000a-2050-11/cidla-teploty-odporove/tewa-temperature-sensors/tt-pt1000a-2050-11-auni/>.
- [41] Alan Shen, Seung Bum Kim, Callum Bailey, Anson W. K. Ma, and Sameh Dardona. Direct write fabrication of platinum-based thick-film resistive temperature detectors. *IEEE Sensors Journal*, 18(22):9105–9111, 2018-11-15. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8463521/>, doi:10.1109/JSEN.2018.2869850.
- [42] Datasheet k teplotnímu senzoru pt100. URL: https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/PT100%20Temperature%20Sensor%20Datasheet.pdf.
- [43] *ČSN EN 60034-2-1 Točivé elektrické stroje – Část 2-1: Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek (s výjimkou strojů pro trakční vozidla)*. Praha, 2nd edition, 2014.

- [44] G. Vandersteen. On the use of compensated total least squares in system identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 43(10):1436–1441, 1998. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/720503/>, doi:10.1109/9.720503.
- [45] Zhijun Zhao and Richard E. Blahut. On the asymptotic consistency of minimum divergence and least-squares principles. *IEEE Transactions on Information Theory*, 53(9):3283–3287, 2007. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4294176/>, doi:10.1109/TIT.2007.903127.
- [46] Daniel Wockinger, Gerd Bramerdorfer, Stephan Drexler, Silvio Vaschetto, Andrea Cavagnino, Alberto Tenconi, Wolfgang Amrhein, and Frank Jeske. Measurement-based identification of lumped parameter thermal networks for sub-kw outer rotor pm machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 59(1):823–833, 2023. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9928554/>, doi:10.1109/TIA.2022.3217029.
- [47] Scipy documentation, February 19, 2023 Version: 1.10.1. URL: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.least_squares.html.
- [48] J. Kennedy and R. Eberhart. Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, pages 1942–1948, Indianapolis, 1995. IEEE. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/488968/>, doi:10.1109/ICNN.1995.488968.
- [49] Zhi-Hui Zhan, Jun Zhang, Yun Li, and H.S.-H. Chung. Adaptive particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 39(6):1362–1381, 2009. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4812104>, doi:10.1109/TSMCB.2009.2015956.
- [50] A. Boglietti, E. Carpaneto, M. Cossale, M. Popescu, D. Staton, and S. Vaschetto. Equivalent thermal conductivity determination of winding insulation system by fast experimental approach. In *2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, pages 1215–1220, USA, 2015. IEEE. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7409216/>, doi:10.1109/IEMDC.2015.7409216.
- [51] Aldo Boglietti, Enrico Carpaneto, Marco Cossale, Silvio Vaschetto, Mircea Popescu, and David Alan Staton. Stator winding thermal conductivity evaluation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(5):3893–3900, 2016. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7500141/>, doi:10.1109/TIA.2016.2582730.

- [52] Aldo Boglietti, Marco Cossale, Silvio Vaschetto, and Thiago Dutra. Winding thermal model for short-time transient. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(2):1312–1319, 2018. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8120010/>, doi:10.1109/TIA.2017.2777920.

Seznam symbolů a zkratek

Parametr	Popis	Jednotka
α	Součinitel přestupu tepla	[W/(m ² ·K)]
a_i	Šířka spodní části	[m]
a_o	Šířka horní části	[m]
C	Tepelná kapacita	[J/K]
c	Měrná tepelná kapacita	[J/(kg·K)]
C_e	Elektrická kapacita	[F]
\mathbf{C}^{-1}	Inverzní matice tepelných kapacit	[1/J]
d_i	Vnitřní průměr mezikruží	[m]
d_o	Vnější průměr mezikruží	[m]
$\Delta\vartheta$	Rozdíl teplot (oteplení)	[K; °C]
δ_{ϑ}	Mezní vrstva teplotní	[m]
δ_v	Mezní vrstva rychlostní	[m]
\mathbf{G}	Matice tepelných vodivostí	[W/K]
G	Tepelná vodivost	[W/K]
G_e	Elektrická vodivost	[S]
g_{kl}	Tepelná vodivost spojující k -tý a l -tý uzel	[W/K]
h	Výška hranolu	[m]
I	Elektrický proud	[A]
J	Proudová hustota	[A/m ²]
l	Charakteristická délka	[m]
λ	Měrná tepelná vodivost	[W/(m·K)]
m	Hmotnost	[kg]
Nu	Nusseltovo číslo	[-]
$\nabla\vartheta$	Gradient teploty	[°C/m]
P_{gen}	Celkové generované ztráty	[W]
p_{gen}	Měrné objemové ztráty	[W/m ³]
Q	Tepelná energie	[J]
Q_e	Elektrický náboj	[C]
\dot{q}	Hustota tepelného toku	[W/m ²]
\dot{Q}	Tepelný tok	[W]
\dot{Q}_s	Tepelný tok sáláním	[W]
$\dot{\mathbf{Q}}$	Matice tepelných toků	[W]
$\dot{\mathbf{q}}$	Vektor hustoty tepelného toku	[W/m ²]
ρ	Hustota	[kg/m ³]
R	Tepelný odpor	[K/W]

R_e	Elektrický odpor	[Ω]
R_p	Tepelný odpor prouděním	[K/W]
R_h	Tepelný odpor hranolu	[K/W]
R_{vo}	Tepelný odpor mezi vnějším a středním poloměrem	[K/W]
R_{vi}	Tepelný odpor mezi středním a vnitřním poloměrem	[K/W]
R_s	Tepelný odpor stěny	[K/W]
$r_{stř}$	Střední hodnota poloměru mezikruží	[m]
R_t	Vnitřní tepelný odpor vedením uvnitř tyče	[K/W]
$R_{v,z}$	Tepelný odpor zubů stroje	[K/W]
R_v	Tepelný odpor mezkruží	[K/W]
r_0	Poloměr tyče	[m]
r_i	Vnitřní poloměr mezikruží	[m]
r_o	Vnější poloměr mezikruží	[m]
S	Teplosměnná plocha	[m ²]
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	[W/(m ² ·K ⁴)]
σ_e	Elektrická měrná vodivost	[S/m]
T_p	Termodynamická teplota povrchu tělesa	[K]
U	Elektrické napětí	[V]
ϑ	Matice výsledných teplot	[°C]
ε	Emisivita	[-]
φ	Elektrický potenciál	[V]
ϑ	Teplota	[°C]
$\dot{\vartheta}$	Matice časových derivací teplot	[°C]
ϑ_∞	Teplota okolní tekutiny	[°C]
ϑ_{max}	Maximální teplota tyče	[°C]
ϑ_p	Teplota povrchu tělesa ve stupních Celsia	[°C]
$\vartheta_{stř}$	Střední teplota	[°C]
v_∞	Rychlost tekutiny v dostatečné vzdálenosti	[m/s]
ϑ_1	Teplota první plochy	[°C]
ϑ_2	Teplota druhé plochy	[°C]

Zkratka	Název
---------	-------

ASM	Asynchronní motor
GPIB	General Purpose Interface Bus
IEC	Národní elektrotechnická komise
LSPMSM	Synchronní stroj s permanentními magnety spouštěný ze sítě
LSM	Metoda nejmenších čtverců
NEMA	Národní asociace výrobců elektrických zařízení

PMSM	Syncronní motor s permanentními magnety
PSO	Metoda využívající roj částic
Spt	Součinitel přestupu tepla
Sso	Součinitel stykového odporu

Seznam příloh

A	Seznam vstupních proměnných zadávaných do výpočtu	81
A.1	Seznam vstupních geometrických proměnných zadávaných do výpočtu	81
A.2	Seznam materiálů zadávaných do výpočtu	83
B	Výsledky oteplovacích charakteristik v jednotlivých uzlech podle Obr. 4.1	85
B.1	Srovnání oteplovacích charakteristik přechodného tepelného modelu s oteplovacími charakteristikami konečnoprvkového tepelného modelu při jmenovitém zatížení	85
B.2	Srovnání oteplovacích charakteristik přechodného tepelného modelu s oteplovacími charakteristikami konečnoprvkového tepelného modelu při proměnlivém zatížení	87

A Seznam vstupních proměnných zadávaných do výpočtu

A.1 Seznam vstupních geometrických proměnných zadávaných do výpočtu

Tab. A.1: Vstupní rozměry LSPMSM zadané do výpočtu.

Symbol	Název
Kostra	
r_{ko}	Vnější poloměr kostry
r_{so}	Vnitřní poloměr kostry
L_{k1}	Délka kostry v oblasti 1
L_{k2}	Délka kostry v oblasti 2
L_{ls}	Tloušťka ložiskového štítu
r_{lo}	Vnější poloměr kruhu na vložení ložiska
r_{lsi}	Vnitřní poloměr kruhu na vložení ložiska
Rotor	
r_{rt}	Vnější poloměr rotoru
r_{hFe}	Vnitřní poloměr rotoru
$L_{Fe05,r}$	Polovina aktivní délky rotoru
b_{0r}	Šířka drážky rotoru v části 0
b_{1r}	Šířka drážky rotoru v části 1
b_{2r}	Šířka drážky rotoru v části 2
h_{0r}	Výška drážky rotoru v části 0
h_{1r}	Výška drážky rotoru v části 1
h_{2r}	Výška drážky rotoru v části 2
l_m	Délka magnetu
b_m	Šířka magnetu
V_m	Výška magnetu
V_{mo}	Vzdálenost konce drážky od středu rotoru
V_{mdi}	Vzdálenost začátku drážky od středu rotoru
r_{zko}	Vnější poloměr kruhu nakrátko
L_{kr}	Délka kruhu nakrátko
Hřídel	

r_{hl}	Poloměr hřídele v oblasti ložiska
r_{hv}	Poloměr hřídele v oblasti styku s vnitřním vzduchu
r_{hn}	Poloměr hřídele v oblasti okolního vzduchu
L_{hr}	Délka hřídele uvnitř rotoru
L_{hn}	Délka hřídele v oblasti okolního vzduchu
L_{hl}	Délka hřídele v oblasti ložiska
L_{hv}	Délka hřídele v oblasti vnitřního vzduchu
ložiska	
b_1	Šířka ložiska
h_1	Výška ložiska
Statorový paket	
L_{c0}	Délka vyčnívajícího vinutí ze statorových plechů
r_{si}	Vnitřní poloměr statoru
r_{jsm}	Střední poloměr jha statoru
b_{0s}	Šířka drážky statorového paketu v části 0
b_{1s}	Šířka drážky statorového paketu v části 1
b_{2s}	Šířka drážky statorového paketu v části 2
h_{0s}	Výška drážky statorového paketu v části 0
h_{1s}	Výška drážky statorového paketu v části 1
h_{2s}	Výška drážky statorového paketu v části 2
r_{js}	Poloměr jha statoru
$L_{Fe05,s}$	Polovina aktivní délky železného svazku statoru
R_c	Střední poloměr toroidu vinutí statoru
$r_{c,1}$	Poloměr toroidu

A.2 Seznam materiálů zadávaných do výpočtu

Tab. A.2: Tepelné vodivosti a ekvivalentní tepelné vodivosti LSPMSM.

Materiál	Symbol	Hodnota [W/(m·K)]
Hliník kostry	λ_k	240,0
Kombinace rotorového plechu a laku, axiální směr	$\lambda_{\text{Fer,a}}$	0,6
Rotorový plech, radiální směr	$\lambda_{\text{Fer,r}}$	35,0
Klec rotoru	λ_{Al}	240,0
Permanentní magnet rotoru	λ_{PM}	9,0
Ocel hřídele	λ_{Ferh}	45,0
Kombinace mědi a laku v drážce statorového paketu, axiální směr	λ_{Cu}	141,0
Kombinace mědi a laku v čelech statorového paketu, tangenciální směr	λ_{Cu}	141,0
Kombinace mědi a laku v drážce statorového paketu, radiální směr	λ_d	1,1
Kombinace mědi a laku v čele statorového paketu, radiální směr	λ_c	1,1
Drážková izolace statorového paketu	λ_i	0,4
Kombinace statorového plechu a laku, axiální směr	$\lambda_{\text{Fes,a}}$	0,6
Statorový plech, radiální směr	$\lambda_{\text{Fes,r}}$	35,0

Tab. A.3: Objemové hustoty LSPMSM.

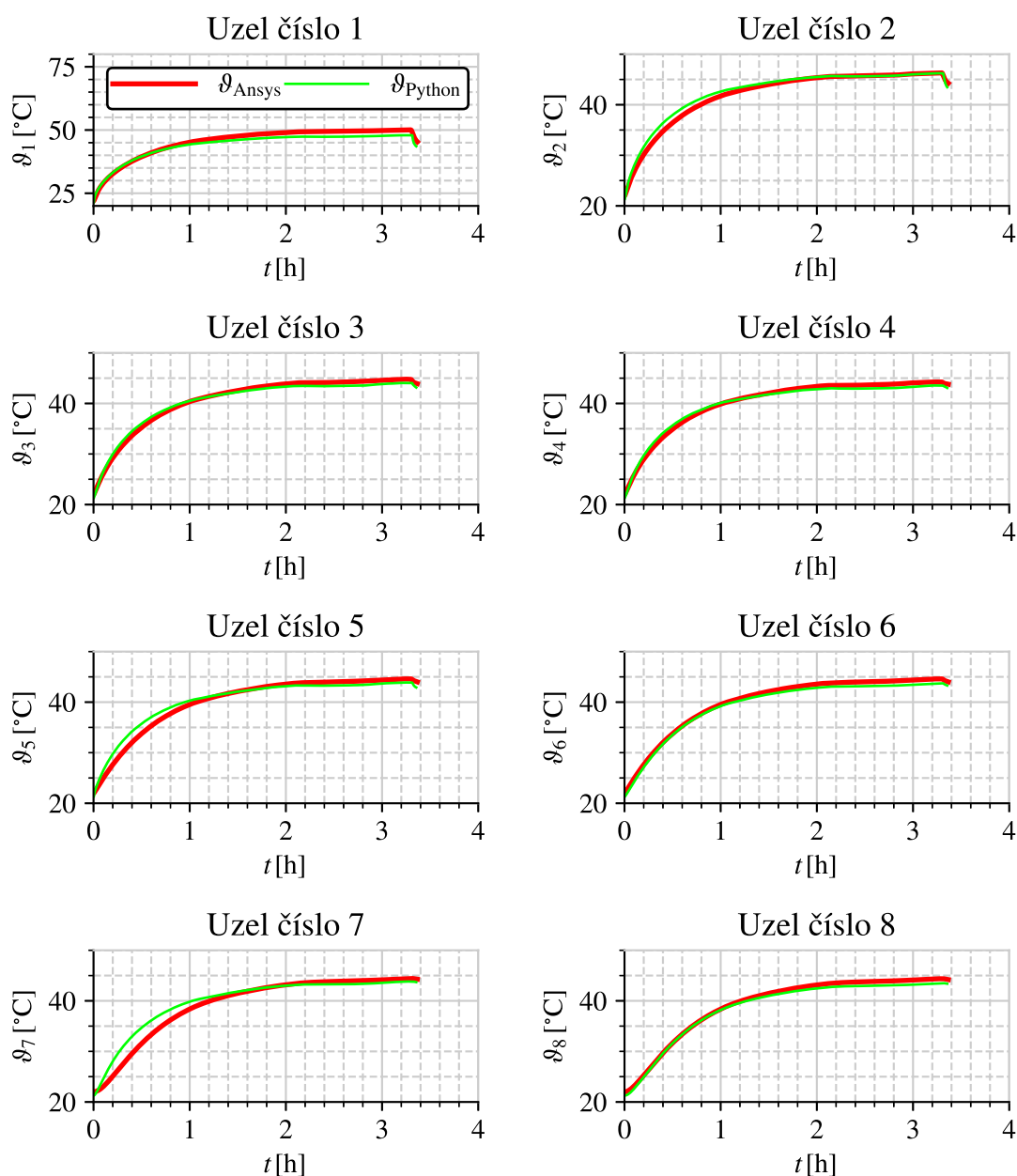
Materiál	Symbol	Hodnota [kg/m ³]
Měď vinutí a čel	ρ_{Cu}	8890
Plech statorového paketu	ρ_{Fes}	7700
Plech rotoru	ρ_{Fer}	7600
Ocel hřídele	ρ_h	7900
Permanentní magnet	ρ_m	7600
Hliník kostry	ρ_k	2700
Hliník ložiskového štítu	ρ_{ls}	2700
Hliník tyčí rotoru	ρ_{tr}	2700
Ocel ložisek	ρ_l	7850

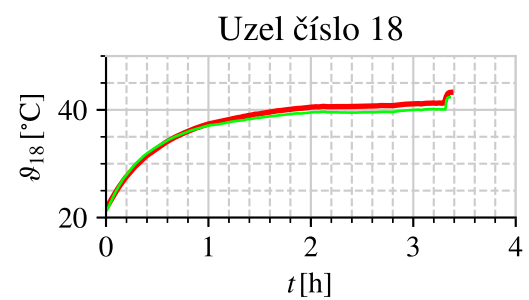
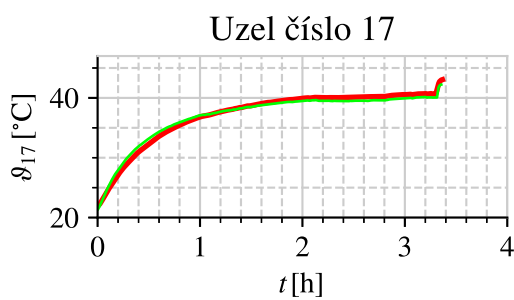
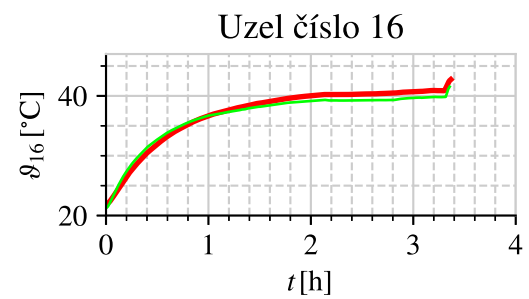
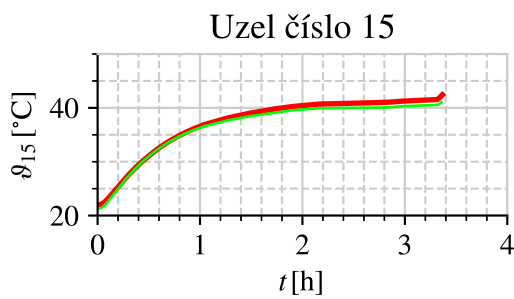
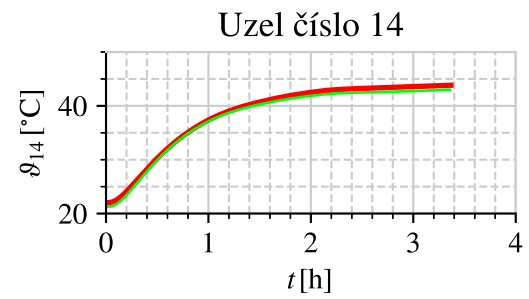
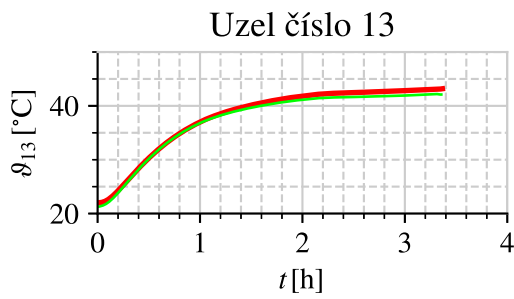
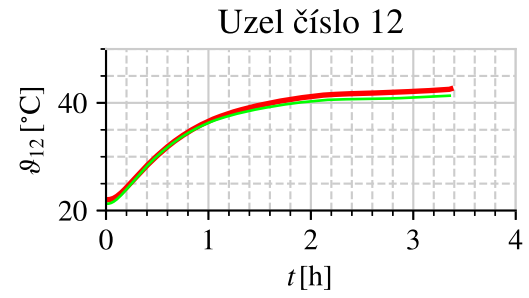
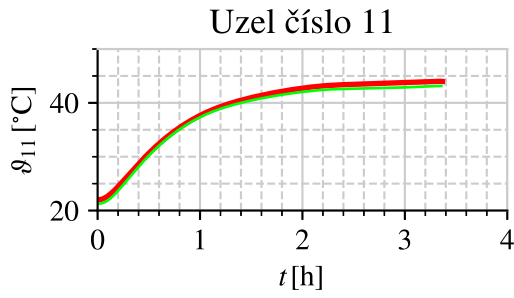
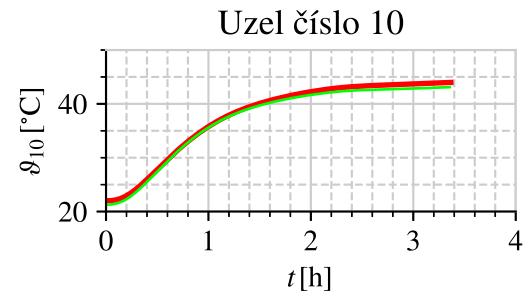
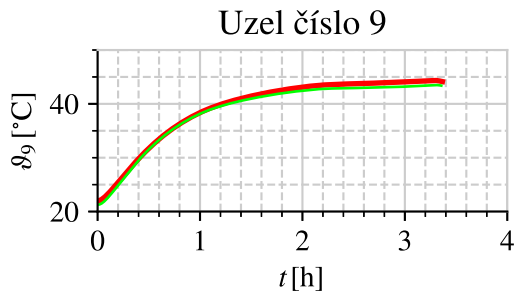
Tab. A.4: Měrné tepelné kapacity LSPMSM při konstantním tlaku.

Materiál	Symbol	Hodnota [J/(Kg·K)]
Měď vinutí a čel	c_{Cu}	383
Plech statorového paketu	c_{Fes}	450
Plech rotoru	c_{Fer}	450
Ocel hřídele	c_h	500
Permanentní magnet	c_m	425
Hliník kostry	c_k	900
Hliník ložiskového štítu	c_{ls}	900
Hliník tyčí rotoru	c_{tr}	900
Ocel ložisek	c_l	450

B Výsledky oteplovacích charakteristik v jednotlivých uzlech podle Obr. 4.1

B.1 Srovnání oteplovacích charakteristik přechodného tepelného modelu s oteplovacími charakteristikami konečnoprvkového tepelného modelu při jmenovitém zatížení





B.2 Srovnání oteplovacích charakteristik přechodného tepelného modelu s oteplovacími charakteristikami konečnoprvkového tepelného modelu při proměnlivém zatížení

