

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2018

Romana Homolová



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 VÝPOČET MOTORU S PERMANENTNÍMI MAGNETY A KLEČÍ NAKRÁTKO

THERMAL CALCULATION OF ELECTRIC MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS AND SQUIRREL CAGE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Romana Homolová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Toman

BRNO 2018



Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Studentka: Romana Homolová

ID: 186082

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Tepelný výpočet motoru s permanentními magnety a klecí nakrátko

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Nastudujte princip činnosti synchronního motoru s permanentními magnety a rozběhovou klecí nakrátko umožňující přímý rozběh ze sítě.
2. Seznamte se se základními principy teorie přenosu tepla a nastudujte metodu tepelných sítí.
3. V programu MATLAB vytvořte tepelný model synchronního motoru s permanentními magnety a rozběhovou klecí nakrátko. Model bude založen na metodě tepelných sítí.
4. Výsledky porovnejte s výpočtem v ANSYSu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] VLACH, Radek. Tepelné procesy v mechatronických soustavách. Skriptum, FSI, VUT v Brně, 2009.

[2] LIST, Vladimír a Josef HAK. Elektrotechnika II, Elektrické stroje - část 1. SNTL, 1969.

[3] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. Design of Rotating Electrical Machines. Second Edition. WILEY, 2014.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 28.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Marek Toman

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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 v první části zabývá pojednáním o synchronním motoru s permanentními magnety a rozběhovou klecí nakrátko umožňující přímý rozběh ze sítě. Jsou zde uvedeny možné konstrukce tohoto motoru, používané magnety a také jeho funkce. Další část práce shrnuje teorii přenosu tepla potřebnou k výpočtu oteplení elektrického točivého stroje. Následující část se věnuje výpočtu oteplení motoru pomocí metody tepelných sítí a je zde uvedena konkrétní síť pro asynchronní motor. Z této sítě poté vychází nově navržená tepelná síť rotoru synchronního motoru s permanentními magnety s přímým připojením na síť. Pro ověření funkčnosti této sítě je proveden výpočet rozložení teploty rotoru v programu Ansys Workbench. V poslední části je následně uvedena navržená tepelná síť celého motoru a také ověření její funkce pomocí výpočtu v programu Ansys.

KLÍČOVÁ SLOVA

LSPMSM, synchronní motor spouštěný ze sítě, oteplení motoru, tepelná síť, tepelný model, Ansys

ABSTRACT

In the first part, this project deals with the elaboration of a Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor. Possible designs of the motor, used magnets and also its function are listed there. The next part of the project summarizes the theory of heat transfer needed to calculate the heating of rotating electric machines. The following section deals with the calculation of the heating of the motor using the method of thermal networks and a specific network for asynchronous motor is presented there. A newly designed rotor network of the Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor is based on this network. To verify the functionality of the network, a calculation of the rotor temperature distribution was done in Ansys Workbench program. The designed thermal network of the whole motor and a verification of its functionality with the calculation from Ansys are presented in the last part of the project.

KEYWORDS

LSPMSM, Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor, heating of motor, thermal network, thermal model, Ansys

HOMOLOVÁ, Romana. *Tepelný výpočet motoru s permanentními magnety a klecí nakrátko*. Brno, 2017, 33 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce: Ing. Marek Toman

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Tepelný výpočet motoru s permanentními magnety a klecí nakrátko“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) 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(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Marku Tomanovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

OBSAH

Úvod	1
1 Synchronní motor s permanentními magnety a klecí nakrátko umožňující přímý rozběh ze sítě	2
1.1 Konstrukce LSPMSM	2
1.2 Rozběh motoru	4
1.3 Permanentní magnety používané v LSPMSM	5
1.3.1 Demagnetizace permanentních magnetů	6
1.4 Výhody a nevýhody LSPMSM	7
1.4.1 Výhody	7
1.4.2 Nevýhody	8
2 Teorie přenosu tepla	9
2.1 Základní pojmy	9
2.1.1 Teplo a teplota	9
2.1.2 Měrná tepelná vodivost	9
2.2 Způsoby přenosu tepla	9
2.2.1 Přenos tepla vedením	10
2.2.2 Přenos tepla prouděním	11
2.2.3 Přenos tepla zářením	11
3 Výpočet oteplení motoru pomocí tepelné sítě	12
3.1 Oteplení motoru	12
3.1.1 Oteplení LSPMSM	12
3.2 Metoda tepelné sítě	13
3.3 Tepelná síť asynchronního motoru	14
4 Výpočet oteplení rotoru LSPMSM	16
4.1 Tepelná síť rotoru LSPMSM	16
4.2 Sestavení rovnic tepelného výpočtu	18
4.3 Ověření funkčnosti tepelné sítě rotoru pomocí programu Ansys	20
4.3.1 Metoda konečných prvků	20
4.3.2 Rotor LSPMSM v programu Ansys Workbench	21
5 Výsledná tepelná síť LSPMSM	23
5.1 Tepelná síť LSPMSM	23
5.2 Ověření funkčnosti tepelné sítě pomocí programu Ansys	25
5.2.1 Geometrie motoru	25

5.2.2 LSPMSM v programu Ansys Workbench	26
6 Závěr	29
Literatura	30
Seznam symbolů, veličin a zkratk	32

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Řez LSPMSM	2
1.2	Struktury LSPMSM	3
1.3	Možnosti uložení PM v rotoru	3
1.4	Momentová charakteristika LSPMSM	4
1.5	Demagnetizační křivky pro různé materiály PM při teplotě 20 °C . .	6
1.6	Demagnetizační křivky Sm ₂ Co ₁₇	6
2.1	Rozložení tepla v rovinné stěně	10
3.1	Příklad tepelné sítě	14
3.2	Tepelná síť asynchronního motoru	15
4.1	Geometrie rotoru	16
4.2	Tepelná síť rotoru LSPMSM	17
4.3	Rozložení teploty na povrchu rotoru	21
4.4	Průběh teploty tyče rotorové klece a jha rotoru	21
4.5	Průběh teploty permanentního magnetu a hřídele	22
5.1	Tepelná síť rotoru LSPMSM	24
5.2	Geometrie LSPMSM	26
5.3	Rozložení teploty v LSPMSM	26
5.4	Průběhy teplot jednotlivých částí	27
5.5	Průběh teploty permanentního magnetu a hřídele	27

SEZNAM TABULEK

1.1	Porovnání teplot PM používaných v LSPMSM	5
1.2	Porovnání účinnosti a účínků pro různé výkony motorů	7
4.1	Porovnání výsledných teplot rotoru	22
5.1	Výsledné teploty LSPMSM	25
5.2	Porovnání výsledných teplot LSPMSM	28

ÚVOD

Celková roční spotřeba energie neustále narůstá. V dnešní době jsou jedním z největších spotřebičů elektrické energie asynchronní motory. Tyto motory však mají nízkou účinnost. Právě proto je nutné asynchronní motory rozvíjet a vytvářet jejich další alternativy, což je rozhodující pro úsporu energie.

Zvyšování účinnosti asynchronních motorů je možné pomocí optimalizace konstrukce, ovšem toto řešení vede pouze k omezenému úspěchu. Jedním z mnoha řešení je nahrazení asynchronních motorů motory s permanentními magnety. Tyto motory mají vyšší účinnost, nicméně pro jejich rozběh je potřeba použití měniče. To se ovšem pojí s vyššími výrobními náklady motoru a snížení celkové efektivity.

K překonání tohoto problému byly vyvinuty synchronní motory s permanentními magnety a klecí nakrátko umožňující přímý rozběh ze sítě. Tyto motory kombinují vysokou účinnost motorů s permanentními magnety a možnost připojení přímo na elektrickou síť, kterou nám poskytují asynchronní motory. Jsou známé již od padesátých let minulého století, avšak až nyní se dostávají na trh. To je možno díky snížení nákladů na výkonné permanentní magnety a zvýšení motivace k rozvoji vysoce efektivních motorů.

Stejně jako u jiných motorů je i zde potřeba správně určit nárůst teploty, aby nedošlo k poškození vinutí statoru, či zhoršení teplotně závislých parametrů magnetů. Naším cílem je zjistit oteplení tohoto motoru pomocí analytické metody - metody tepelné sítě.

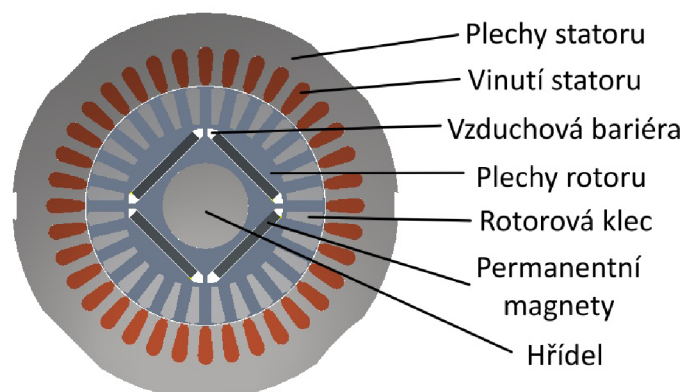
1 SYNCHRONNÍ MOTOR S PERMANENTNÍMI MAGNETY A KLECÍ NAKRÁTKO UMOŽŇUJÍCÍ PŘÍMÝ ROZBĚH ZE SÍTĚ

Synchronní motor s permanentními magnety a klecí nakrátko může být též nazýván synchronní motor s permanentními magnety s přímým připojením na síť. Anglický název zní Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor, dále bude používána zkratka LSPMSM. Tyto motory mohou být použity místo malých asynchronních motorů tam, kde má být motor připojen přímo k elektrické síti bez použití měničů. Lze je využít například u čerpadel, ventilátorů apod.

LSPMSM jsou známé jako vysoce účinné motory, které mají ve srovnání s jinými elektrickými motory řadu výhod. S použitím těchto motorů lze ušetřit 3 až 5 % energie z celkové spotřeby elektromotorů. LSPMSM se rozbíhá jako asynchronní motor, avšak v ustáleném stavu se tento motor téměř neliší od synchronního motoru s permanentními magnety. LSPMSM má tedy vyšší účinnost než asynchronní motor o stejném výkonu, jelikož nemá ztráty v rotoru.[1]

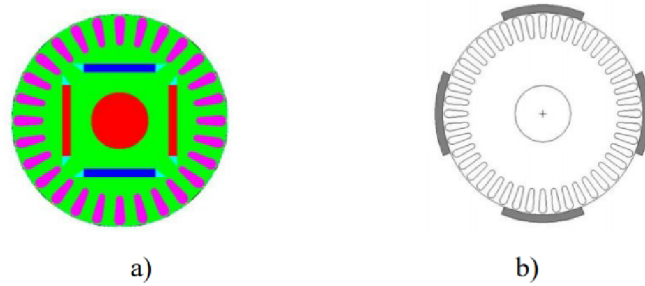
1.1 Konstrukce LSPMSM

Za LSPMSM lze považovat kombinaci synchronního motoru s permanentními magnety a asynchronního motoru. Skládá se z jednofázového nebo vícefázového statoru, který je stejný jako u asynchronního motoru, a hybridního rotoru obsahujícího vodivou klec nakrátko a permanentní magnety. Řez motorem a jeho složení lze vidět na obr. 1.1.



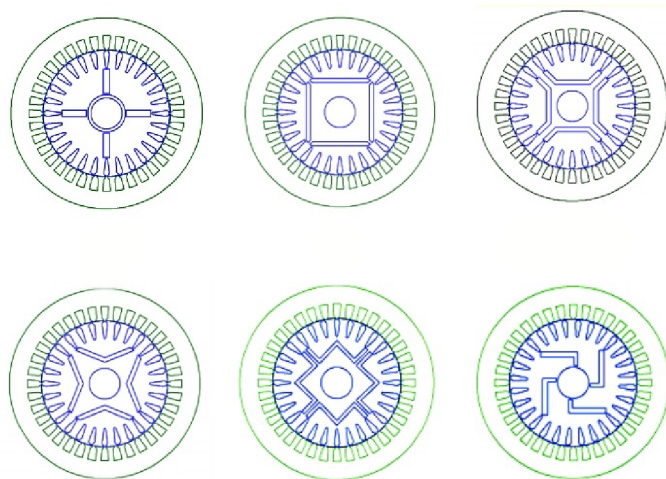
Obr. 1.1: Řez LSPMSM

Dle uspořádání magnetů může být LSPMSM rozdělen na dva typy: ILSPMSM (anglicky Interior Magnet Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor), který má permanentní magnety uloženy uvnitř rotoru a SLSPMSM (anglicky Surface Magnet Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor), jehož magnety jsou připevněny na povrchu rotoru (viz obr. 1.2). [1]



Obr. 1.2: Struktury LSPMSM a) ILSPMSM b) SLSPMSM [1]

Mezi těmito dvěma typy motorů je několik rozdílů. Permanentní magnety uložené v rotoru jsou lépe chráněny před demagnetizací než permanentní magnety, které jsou na povrchu rotoru. Výroba SLSPMSM je však jednodušší a tento motor může vytvářet vyšší moment přes menší vzdálenost mezi magnety a statorovým vinutím. Oproti tomu ILSPMSM vytváří menší vibrace a také při rozběhu dosáhne rychleji synchronních otáček. Pro tento typ motoru se v literatuře vyskytuje několik základních možností uspořádání permanentních magnetů v rotoru (viz obr. 1.3). [1]



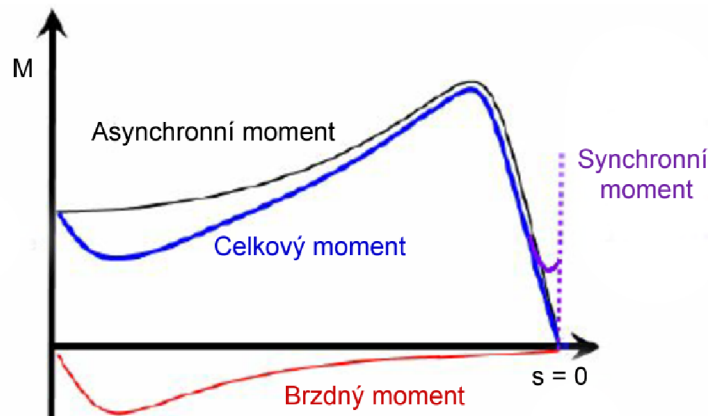
Obr. 1.3: Možnosti uložení PM v rotoru [1]

Typ uložení permanentních magnetů může mít vliv na celkový výkon, účinnost i počáteční točivý moment. Při návrhu konstrukce je velmi důležitá správná kombinace klece, umístění a tvar permanentních magnetů. [4]

1.2 Rozběh motoru

LSPMSM mají stejný rozběh jako asynchronní motory. Třífázové satorové vinutí vytváří magnetické pole, které ve vinutí rotoru indukují napětí. Vzhledem k tomu, že vinutí rotoru je klec nakrátko, protéká jím proud, který vytváří magnetické pole rotoru. [5]

LSPMSM obsahuje oproti asynchronnímu motoru ještě permanentní magnety v rotoru, které vytváří opačný točivý moment vyvolaný magnety (tzv. brzdny moment). Brzdny moment je u těchto motorů velkým problémem a vyskytuje se během celé doby rozběhu až do synchronní rychlosti. [4]



Obr. 1.4: Momentová charakteristika LSPMSM [6]

Celkový moment (viz obr. 1.4) se tedy skládá ze dvou částí, z momentu vyvolaného klecovou kotvou a brzdnyho momentu

$$M_{\text{celk}} = M_{\text{mag}} + M_{\text{klece}}, \quad (1.1)$$

kde M_{celk} je celkový moment, M_{mag} je brzdny moment a M_{klece} je moment vyvolaný klecovou kotvou.

Během celého startovacího procesu musí být zátěžny moment M_z menší než celkový točivý moment vyvinutý motorem [1]

$$M_z < M_{\text{celk}}. \quad (1.2)$$

Po asynchronním rozběhu motor volně přechází do synchronních otáček. V pracovním režimu poté běží na synchronních otáčkách.

1.3 Permanentní magnety používané v LSPMSM

Pro LSPMSM jsou používány permanentní magnety z kovů vzácných zemin, nejčastěji z prvků Samarium-Kobalt (SmCo) či Neodym-Železo-Bór (NdFeB). Tyto magnety jsou poměrně nákladné, avšak jejich vysoká chemická i teplotní odolnost je činí velice výhodnými. Mají také velmi dobrou odolnost proti působení vnějšího demagnetizačního pole. V tabulce 1.1 jsou porovnány provozní teploty a Currieho teploty¹ používaných permanentních magnetů.

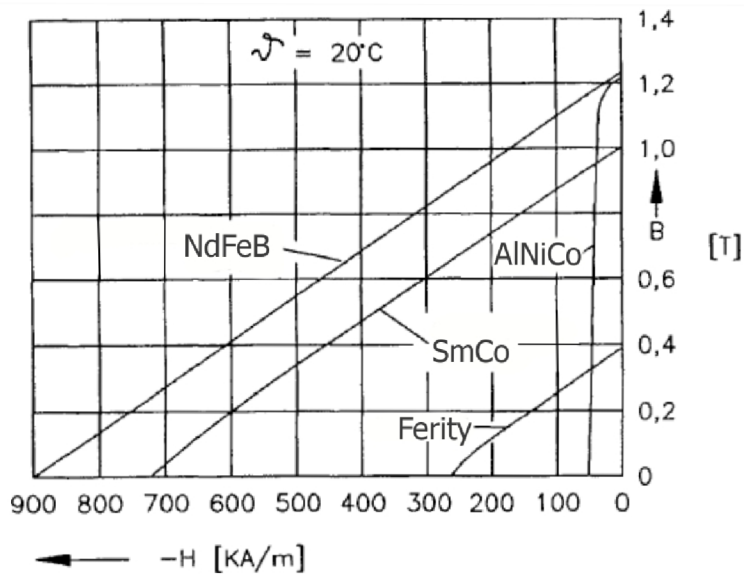
Tab. 1.1: Porovnání teplot PM používaných v LSPMSM (data z [7])

Permanentní magnety	Maximální provozní teplota	Currieho teplota
SmCo ₅	250 °C	750 °C
Sm ₂ Co ₁₇	300 °C	825 °C
Nd ₂ Fe ₁₄ B	150 °C	310 °C

SmCo (SmCo₅ nebo Sm₂Co₁₇) magnety jsou charakterizovány vysokou remanentní hustotou magnetického toku a lineární křivkou demagnetizace. Jsou velice odolné vůči působení vnějšího demagnetizačního pole, což znamená, že jsou velice vhodné pro použití v elektromechanice. Tyto magnety nevyžadují žádnou povrchovou úpravu, jelikož jsou vysoce odolné proti korozi. Nevýhodou je však jejich křehkost, která znesnadňuje obrábění. Také jsou velmi náchylné ke štěpení. Tyto magnety mohou být používány při vyšších teplotách než magnety NdFeB. Jejich maximální provozní teplota se pohybuje od 250 °C do 300 °C v závislosti na typu použitých magnetů. [9]

NdFeB (Nd₂Fe₁₄B) jsou nejvýkonnější komerčně vyráběné magnety. Jejich maximální provozní teplota je ovšem pouze do 200°C, Currieho teplota potom cca 300°C. Magnetické vlastnosti těchto magnetů jsou lepší než magnetické vlastnosti SmCo, ale pouze při provozních teplotách nižších než 80°C. Z obr. 1.5 je patrné, že při pokojové teplotě mají vyšší demagnetizační parametry. Demagnetizační křivka těchto magnetů je ovšem silně závislá na teplotě, což znamená zhoršení parametrů se vzrůstající teplotou. NdFeB mají také velmi vysokou pevnost, magnetickou indukci a koercitivní sílu. Nevýhodou těchto magnetů je malá odolnost proti korozi, proto vyžadují povrchovou úpravu. [9]

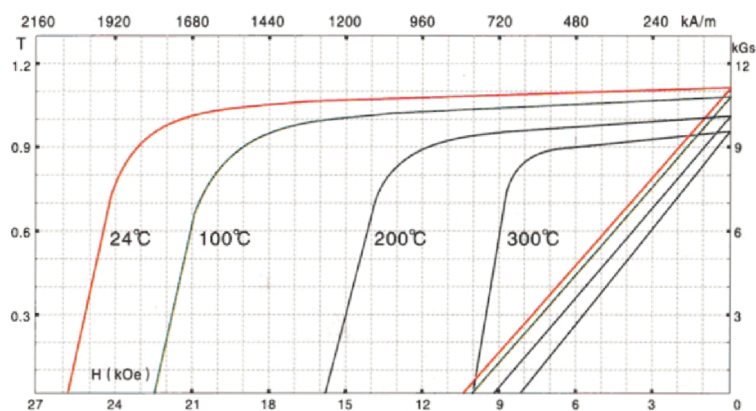
¹Teplotní bod nad kterým ztrácí materiál své magnetické vlastnosti



Obr. 1.5: Demagnetizační křivky pro různé materiály PM při teplotě 20°C [1]

1.3.1 Demagnetizace permanentních magnetů

Při dosažení Currieho teploty ztrácí materiály permanentních magnetů své magnetické vlastnosti. Proto při přehřátí motoru, nebo při velkém indukovaném proudu ve vinutí a v rotorových tyčích, hrozí riziko jejich demagnetizace. Jak je vidět na obr. 1.6, demagnetizační křivky použitých magnetů jsou také závislé na teplotě. Proto je správné určení nárůstu teploty magnetů zásadním krokem při návrhu motoru. [1]



Obr. 1.6: Demagnetizační křivky $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ [10]

1.4 Výhody a nevýhody LSPMSM

LSPMSM mají velmi mnoho žádaných vlastností elektromotorů. Objevuje se u nich řada výhod, které ve velké míře převažují nevýhody.

1.4.1 Výhody

Účinnost

V posledních letech se zvýšily požadavky na účinnost motorů. Normy, které vyžadují nadprůměrnou účinnost elektrických točivých strojů, nejsou klasické asynchronní motory schopny plnit. Ovšem v porovnání s asynchronními motory má LSPMSM podstatně nižší ztráty, tzn. i vyšší účinnost. Podle [4] téměř 20 % ztrát motoru tvoří ztráty v rotoru. Tyto ztráty jsou však v LSPMSM téměř zanedbatelné s výjimkou ztrát tvořenými vyššími harmonickými. Díky výraznému snížení magnetizačního proudu a tím i amplitudy vstupního proudu motoru se snižují i ohmické ztráty statoru. [4]

Účíník

Asynchronní motory mají kvůli svému induktivnímu charakteru malý účíník. Ten způsobuje zvýšení ztrát ve vinutí a může vést k přehřátí a předčasnému selhání motoru. Způsobuje také velké ztráty ve statorovém vinutí motorů. Oproti tomu LSPMSM mají účíník podstatně vyšší.

Porovnání účinností a účíníků obou motorů je uvedeno v tabulce 1.2. Tyto ilustrativní hodnoty jsou převzaté ze [4]. Je vidět, že účíník i účinnost motoru závisí na jeho výkonu. U asynchronních motorů je tento rozdíl poměrně velký a s rostoucím výkonem se parametry motoru zlepšují. Avšak stejných parametrů jako LSPMSM nedosáhne.

Tab. 1.2: Porovnání účinnosti a účíníků pro různé výkony motorů (upraveno z [4])

Výkon motoru	Asynchronní motor		LSPMSM	
	Účinnost	Účíník	Účinnost	Účíník
0,6 kW	0,733	0,688	0,862	0,986
1,5 kW	0,809	0,770	0,892	0,895
3,7 kW	0,868	0,854	0,904	0,879
18,6 kW	0,936	0,880	0,957	0,920

1.4.2 Nevýhody

Cena

Velkou nevýhodou těchto motorů je především cena. LSPMSM mají složitější konstrukci, což znatelně zvyšuje výrobní náklady. Pokud bychom porovnávali náklady na materiál asynchronních motorů s náklady na materiál LSPMSM, budou velký rozdíl tvořit hlavně náklady na permanentní magnety. Výběr vhodných typů magnetů je velice důležitý a na jejich kvalitě závisí i stabilita LSPMSM. Podle [4] je LSPMSM cca o 20 % dražší než asynchronní motor o stejném výkonu. Avšak i přes vysoké počáteční náklady mohou být LSPMSM ekonomičtější a to díky úsporám energie.

Výroba

LSPMSM jsou vyráběny ve stejných velikostech, jako běžné asynchronní motory. I když je stator LSPMSM stejný jako stator asynchronního motoru o stejném výkonu, topologie rotoru je komplikovanější kvůli přítomnosti permanentních magnetů. Proto je v některých případech nutné zmenšit průměr hřídele, aby bylo pro umístění permanentních magnetů uvnitř tělesa motoru dostatek místa. To může způsobovat větší problémy ve výrobě.

Problém může nastat i při svařování rotorové klece, kdy vlivem tepla mohou degradovat vlastnosti permanentních magnetů a tím by se mohly zhoršit parametry motoru. [1]

2 TEORIE PŘENOSU TEPLA

Pro pochopení způsobu, jakým dochází k ohřevu součástí je nutné znát fyzikální podstatu přenosu tepla. V této kapitole jsou stručně popsány způsoby přenosu tepla i základní pojmy, které se v této problematice vyskytují.

2.1 Základní pojmy

2.1.1 Teplo a teplota

Teplo a teplota jsou často zaměňované pojmy, přitom se jedná o různé veličiny. Teplo Q , nebo také tepelná energie, je celková energie molekulárního pohybu v látce a je udávána v [J]. Tato energie závisí na rychlosti, počtu, velikosti a typu částic v materiálu. Teplo není závislé pouze na stavu soustavy, ale i na reakci s okolím.

Teplota materiálu je průměrná energie molekulárního pohybu v látce a nezávisí na velikosti a typu objektu. Vyjadřuje tedy jeho tepelný stav. Jedná se buď o absolutní (termodynamickou) teplotu T udávanou v [K], nebo teplotu obecnou ϑ udávanou ve [°C]. Přidáním tepla se zvýší teplota objektu. Vyšší teploty tedy znamenají, že se molekuly pohybují s vyšší energií. [9]

2.1.2 Měrná tepelná vodivost

Měrná tepelná vodivost λ je fyzikální vlastností materiálu. Je to schopnost materiálu vést teplo. Definuje se jako tepelná energie přenášená za jednotku času na jednotku plochy povrchu vydělená teplotním rozdílem v [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]. Měrná tepelná vodivost se mírně mění s teplotou a proto se ve většině případů bere její střední hodnota. [9]

Nejlepší tepelné vodiče jsou kovy; z nich například stříbro s $\lambda_{\text{Ag}} = 418 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, měď s $\lambda_{\text{Cu}} = 393 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, nebo hliník s $\lambda_{\text{Al}} = 229 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Naopak nejmenší tepelnou vodivost mají plyny, úplně nejnižší potom vakuum. Například vzduch má při normálním tlaku měrnou tepelnou vodivost $\lambda = 0,026 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, a proto se materiály s dutinami obsahujícími vzduch využívají jako tepelné izolanty. [11]

2.2 Způsoby přenosu tepla

Přenos tepla mezi dvěma tělesy může probíhat třemi způsoby:

- Vedení (kondukce)
- Proudění (konvekce)
- Záření (radiace)

Uvedené způsoby přenosu tepla se ve většině případů vyskytují současně. Při tepelných výpočtech elektrických strojů se ovšem setkáváme především s prvními dvěma způsoby přenosu tepla. Přenos tepla zářením se ve většině případů zanedbává. [11]

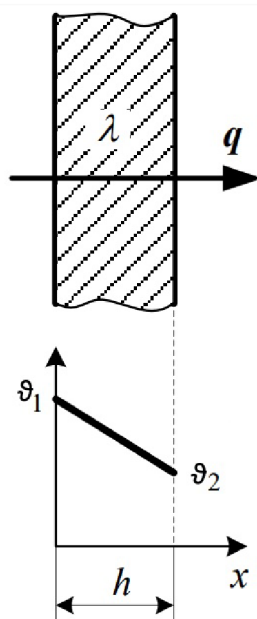
2.2.1 Přenos tepla vedením

Přenos tepla vedením se vyskytuje především v pevných látkách. Energie je přenášena neustále se pohybujícími vnitřními částicemi. Přenos tepla probíhá vždy z teplejšího místa do místa chladnějšího. [11]

Základní teorii přenosu tepla vedením vyjadřuje Fourierův zákon

$$\mathbf{q} = -\lambda \cdot \text{grad}T, \quad (2.1)$$

kde \mathbf{q} je vektor hustoty tepelného toku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], λ je měrná tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] a $\text{grad}T$ je gradient teploty [$\text{K}\cdot\text{m}^{-1}$]. Fourierův zákon obsahuje znaménko mínus, které značí, že je teplo přenášeno ve směru klesající teploty. [11]



Obr. 2.1: Rozložení tepla v rovinné stěně [11]

Pomocí tohoto zákona lze zapsat vztah pro vedení tepla rovinnou stěnou (viz obr. 2.1) jako

$$q = \frac{\lambda}{h} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2), \quad (2.2)$$

kde q je hustota tepelného toku [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], λ je měrná tepelná vodivost [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], h je tloušťka rovinné stěny [m], ϑ_1 a ϑ_2 jsou teploty různých stran stěny [$^{\circ}\text{C}$]. [11]

Pro celkový tepelný tok Q procházející rovinou stěnou o ploše S a tloušťce h potom platí rovnice

$$Q = \frac{\lambda \cdot S}{h} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2). \quad (2.3)$$

2.2.2 Přenos tepla prouděním

Sdílení tepla prouděním se vyskytuje u tekutin (kapalin a plynů), nebo mezi pevnou látkou a tekutinou. Je způsobeno prouděním tekutiny, kdy při pohybu dochází k přenašení tepla z teplejší části do chladnější části a naopak. Je rozlišováno přirozené a nucené proudění tekutiny. Přirozené proudění vzniká pouze rozdílnou teplotou tekutiny a to díky závislosti hustoty tekutiny na teplotě. Naopak nucené proudění je vytvářeno vnější silou (ventilátorem, čerpadlem apod.). [11]

Tepelný odpor látky R_{ϑ} lze spočítat ze vztahu

$$R_{\vartheta} = \frac{1}{\alpha \cdot S}, \quad (2.4)$$

kde α je součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]. Ten závisí na mnoha parametrech, především na fyzikálních vlastnostech tekutiny, způsobu obtékání povrchu, rychlosti proudění. Veličina S značí plochu [m^2], ze které teplo odchází.

2.2.3 Přenos tepla zářením

Přenos tepla zářením se uskutečňuje elektromagnetickým zářením o vlnové délce $0,8 \mu\text{m}$ až 1 mm , tzn. že tento přenos tepla je na rozdíl od přenosu tepla vedením a prouděním možný i ve vakuu. Každé těleso s teplotou vyšší, než je absolutní nula, sdílí teplo zářením. Velikost vyzářeného tepla závisí na čtvrté mocnině jeho teploty a na emisivitě povrchu. Tepelnou energii vyzařovanou tělesem popisuje Stefan-Boltzmannův zákon

$$M = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (2.5)$$

kde M je intenzita vyzařování [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], ε značí spektrální emisivitu (pro dokonale černé těleso platí $\varepsilon = 1$, pro ostatní materiály je $\varepsilon < 1$), σ je Stefan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) a T značí termodynamickou teplotu [K]. [11][13]

3 VÝPOČET OTEPLENÍ MOTORU POMOCÍ TEPELNÉ SÍTĚ

3.1 Oteplení motoru

Elektrické motory generují teplo jako důsledek elektrických a mechanických ztrát. Tyto ztráty jsou vysoké zejména při startu nebo brzdění a rostou se zvyšující se zátěží. S rozvojem techniky se navíc i zvyšují nároky na výkon motorů, kterého lze dosáhnout použitím větších proudových zatížení, nebo provozováním motoru ve vyšších rychlostech. Vysoká proudová hustota ve vinutí statoru však vede také k významným ztrátám v mědi a tím i zvyšování tepelných ztrát. [9]

Oteplení motoru je výrazný problém zvláště v částech, kde je obtížné chlazení, např. v rotorovém vinutí. Teplota vinutí hraje zásadní roli ve spolehlivosti a trvanlivosti vyráběných strojů. Každé zvýšení teploty o 10 °C má za následek snížení životnosti izolačního materiálu cca o 50 % a tím i snížení životnosti motoru. Navíc teplota vinutí přímo ovlivňuje i účinnost motoru. [12]

Kontrola oteplení elektrických strojů je velmi náročná oblast, která vyžaduje vhodná řešení pro každý stroj a jeho provozní podmínky. Existuje několik metod analýzy oteplení elektrických strojů. V této práci je využita metoda analytická i numerická.

3.1.1 Oteplení LSPMSM

V asynchronních motorech jsou ztráty rotoru tvořeny především Jouleovými ztrátami v kleci. V LSPMSM jsou ztráty v rotoru díky nulovému skluzu zanedbatelné. Teplota rotoru těchto motorů je tedy nižší než teplota asynchronních motorů o stejném výkonu. Avšak i přesto je důležité správně odhadnout oteplení rotorového vinutí.

Vzhledem k riziku trvalé demagnetizace permanentních magnetů v rotoru při vysokých teplotách, je nutné znát přesné rozložení teploty v těchto motorech. Kromě toho má oteplení motoru vliv i na teplotně závislé parametry permanentních magnetů a tím i na parametry motoru. [4]

3.2 Metoda tepelné sítě

Metoda výpočtu oteplení elektrických strojů pomocí tepelných sítí je metoda analytická a využívá se již několik desítek let. Přesto, že se jedná o jednu ze starších metod, i v dnešní době se díky své jednoduchosti v porovnání s metodami numerickými hojně využívá. Tato metoda je založena na analogii tepelných obvodů s obvody elektrickými. Tepelný odpor R_{ϑ} tedy odpovídá elektrickému odporu R

$$R_{\vartheta} = \rho_{\vartheta} \cdot \frac{l}{S} \Leftrightarrow R = \rho \cdot \frac{l}{S}, \quad (3.1)$$

oteplení $\Delta\vartheta$ odpovídá elektrickému napětí U

$$\Delta\vartheta = \vartheta_2 - \vartheta_1 \Leftrightarrow U = \varphi_2 - \varphi_1, \quad (3.2)$$

celkovému tepelnému toku Q potom odpovídá elektrický proud I

$$Q = \frac{\Delta\vartheta}{R_{\vartheta}} \Leftrightarrow I = \frac{U}{R}. \quad (3.3)$$

Vytvoření matematického modelu je možné pouze v případě, kdy jsou přesně definované způsoby přenosu tepla a tepelné pole je v homogenním prostředí. To znamená řadu zjednodušujících předpokladů. Nespornou výhodou této metody ovšem je, že může být použita jak pro rotační elektrické stroje, tak i pro netočivé, případně jiné výkonové prvky. [13][14][15]

Výpočet oteplení metodou tepelné sítě (též nazývána metoda ekvivalentních tepelných okruhů) využívá určení přibližné střední teploty jednotlivých částí tělesa. Tato metoda spočívá ve vytvoření tepelného schématu, které musí detailně popsat strukturu stroje; tzn. zahrnuje veškeré části stroje. Tepelná síť se skládá z uzlů, větví a norů. Uzel sítě představuje střední teplotu, která je pro nás neznámá. Jednotlivé uzly poté spojují větve, které charakterizují přestup tepla mezi nimi. Nory představují cesty přestupu tepla do okolí. Větve a nory jsou charakterizovány tepelným odporem R_{ϑ} , respektive tepelnou vodivostí g_{ϑ}

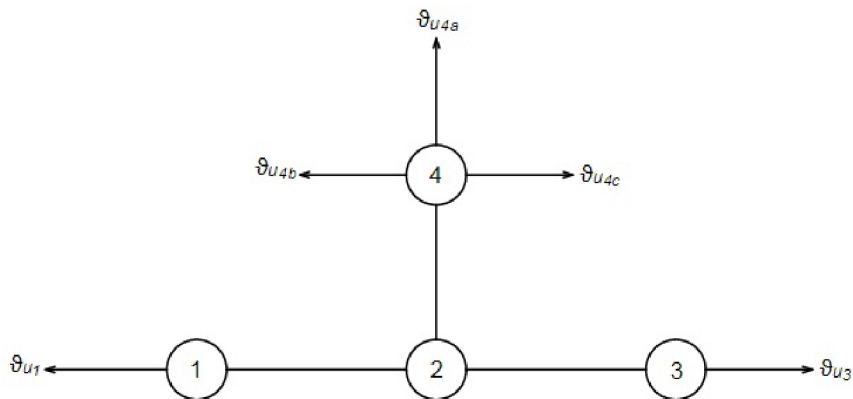
$$g_{\vartheta} = \frac{1}{R_{\vartheta}}, \quad (3.4)$$

$$R_{\vartheta} = \frac{1}{\alpha \cdot S} = \frac{h}{\lambda \cdot S}, \quad (3.5)$$

kde α je součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$], S plocha [m^2], h tloušťka materiálu [m] a λ měrná tepelná vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]. Z této rovnice lze součinitel přestupu tepla α vyjádřit jako

$$\alpha = \frac{\lambda}{h}. \quad (3.6)$$

Příklad jednoduché sítě bez zobrazení tepelných odporů je uveden na obrázku 3.1. Toto schéma je složeno ze 4 uzlů, 3 větví a 5 norů. [15]



Obr. 3.1: Příklad tepelné sítě [15]

Tepelný výpočet poté obsahuje soustavu lineárních rovnic, jejichž počet odpovídá počtu uzlů sítě. V ustáleném stavu lze k řešení použít maticový zápis

$$\mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\vartheta} = \mathbf{Q}, \quad (3.7)$$

kde \mathbf{G} je matice tepelných vodivostí, $\boldsymbol{\vartheta}$ je matice neznámých teplot a \mathbf{Q} je matice celkových tepelných toků. [16]

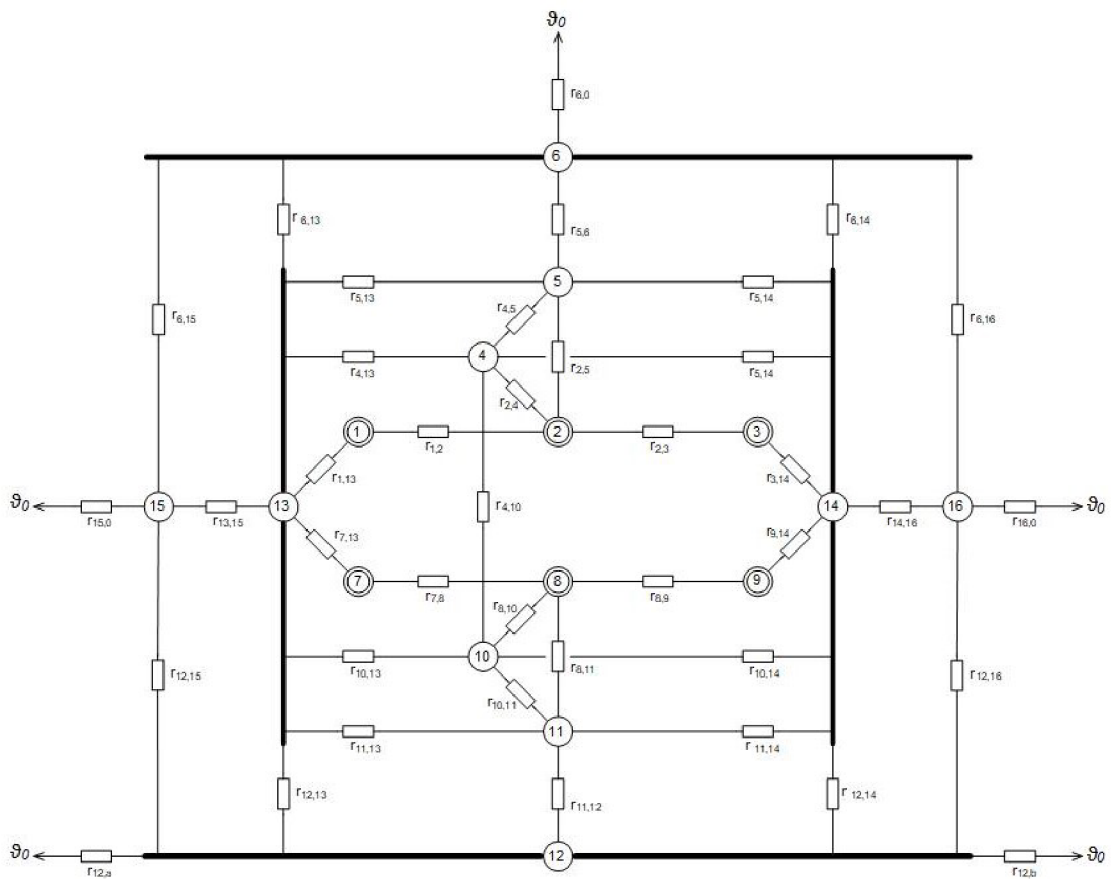
Neznámé teploty lze zjistit vyjádřením matice $\boldsymbol{\vartheta}$

$$\boldsymbol{\vartheta} = \mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{Q} \quad (3.8)$$

3.3 Tepelná síť asynchronního motoru

Cílem práce je sestavení tepelné sítě LSPMSM. Ta bude vycházet z tepelné sítě asynchronního motoru, která je pro nás známá z [17]. Tato síť (viz obr. 3.2) je určena pro asynchronní motor v provedení IP44, nakrátko, s žebrovanou kostrou. Síť zobrazuje celý stroj s 16 tepelnými zdroji, z nichž každý reprezentuje jednu zkoumanou část motoru. Pro výpočet jednotlivých středních teplot uzlů je nutné znát geometrické rozměry stroje a jeho fyzikální vlastnosti. Pro správný výpočet je nejdůležitější správně určit velikosti tepelných odporů, což je nejsložitější částí celého výpočtu. Rovnice pro jejich výpočet je možné najít v [17].

Funkce dané tepelné sítě byla ověřena v [16] experimentálním měřením oteplovací charakteristiky při jmenovitém zatížení motoru. Při dalších návrzích bude tedy z tohoto funkčního schématu vycházeno.



Obr. 3.2: Tepelná síť asynchronního motoru, upraveno z [17]

Význam jednotlivých uzlů sítě

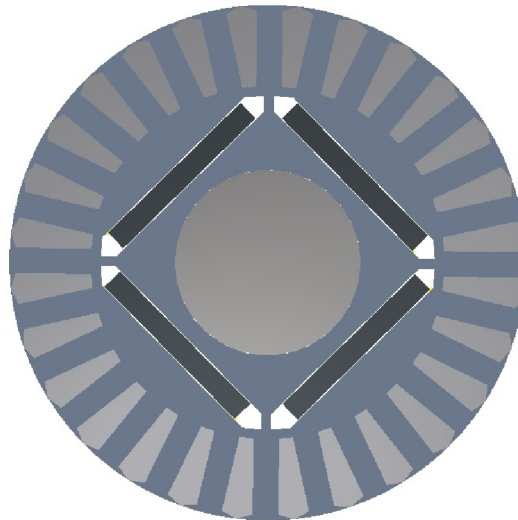
- | | |
|------------------------------------|--------------------------------|
| 1 - Čelo vinutí statoru | 9 - Kruh rotorové klece |
| 2 - Vinutí v drážce statoru | 10 - Zuby rotoru |
| 3 - Čelo vinutí statoru | 11 - Jho rotoru |
| 4 - Zuby statoru | 12 - Hřídel |
| 5 - Jho statoru | 13 - Vnitřní vzduch |
| 6 - Kostra | 14 - Vnitřní vzduch |
| 7 - Kruh rotorové klece | 15 - Zadní štít |
| 8 - Tyče rotorové klece | 16 - Přední štít |

4 VÝPOČET OTEPLENÍ ROTORU LSPMSM

Jak již bylo zmíněno, LSMSM má stator totožný se statorem asynchronního motoru, liší se tedy pouze rotor. Aby byl možný tepelný výpočet celého motoru, je důležité nejprve správně navrhnout tepelnou síť rotoru LSPMSM a ověřit její funkčnost. Rotor bude v této části řešen nezávisle na motorovém celku.

4.1 Tepelná síť rotoru LSPMSM

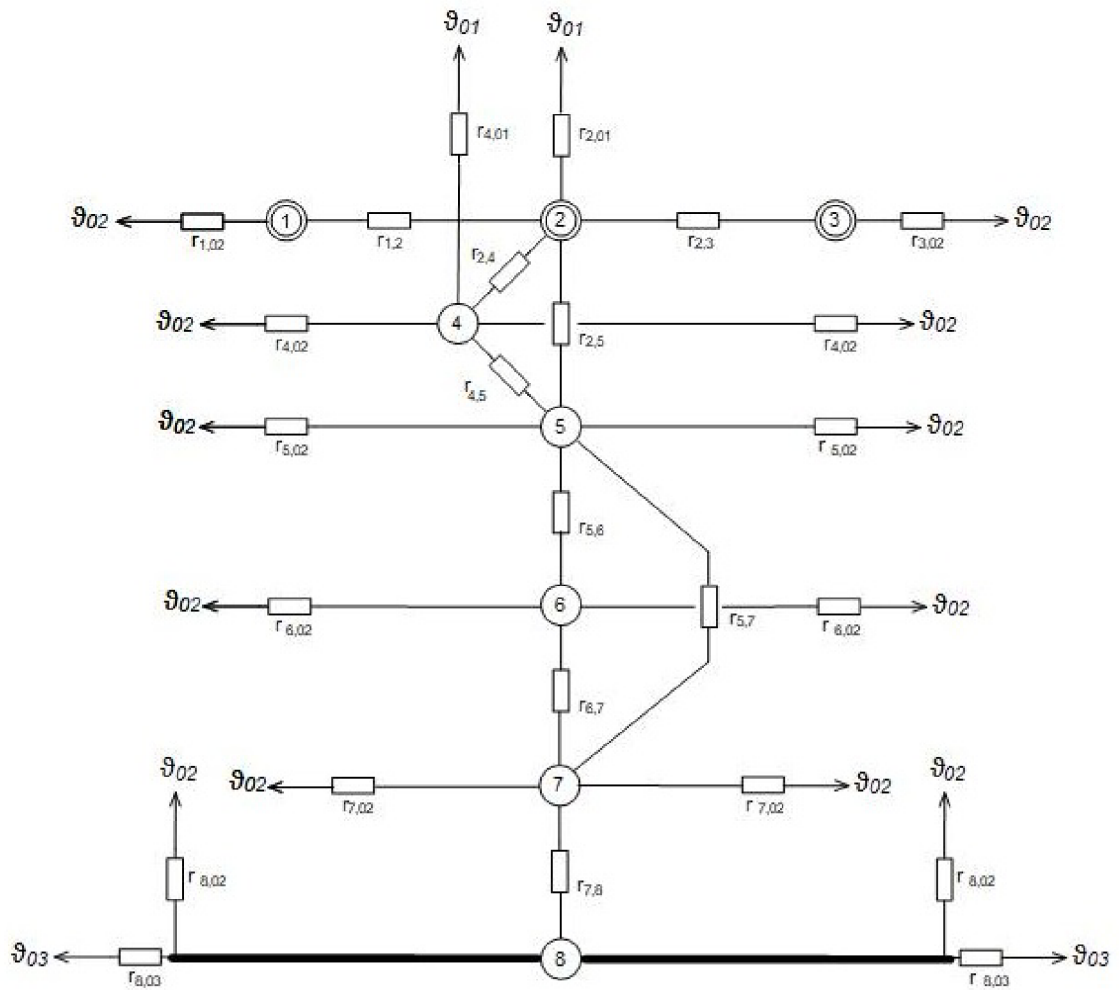
Celý návrh tepelné sítě rotoru vychází z jeho geometrie (viz obr. 4.1). Pro tuto situaci byl zvolen typ LSPMSM se čtyřmi permanentními magnety uloženými uvnitř rotoru. Konkrétně byly zvoleny permanentní magnety typu NdFeB s koercitivní silou $907 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$, Currieho teplotou rovnou $310 \text{ }^\circ\text{C}$ a měrou tepelnou vodivostí o velikosti $7,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [8].



Obr. 4.1: Geometrie rotoru

Oproti asynchronnímu motoru se tento rotor liší pouze přítomností magnetů, které rozdělují jeho rotoru na dvě části; na část nad magnetem (jho 1) a část blíže hřídeli (jho 2). Velká část tepelného toku půjde úzkým přechodem mezi jednotlivými magnety, respektive částí spojující obě části jha.

Navržená tepelná síť rotoru LSPMSM je na obr. 4.2. Tato síť je navržena nezávisle na motorovém celku, proto je z uzlů dán odvod tepla pouze do okolních teplot. Ty jsou v samotném výpočtu nastaveny dle teoretických hodnot teplot, které by mohly být uvnitř motoru při teplotě okolí $20 \text{ }^\circ\text{C}$. V porovnání s tepelnou sítí asynchronního motoru je viditelná změna pouze v přidání dvou uzlů (**7** - permanentní magnet a **6** - jho 2 rotoru) a spojovací větve mezi oběma částmi jha rotoru.



Obr. 4.2: Tepelná síť rotoru LSPMSM

Význam jednotlivých uzlů sítě

- | | |
|-------------------------|------------------------|
| 1 - Kruh rotorové klece | 5 - Jho 1 rotoru |
| 2 - Tyče rotorové klece | 6 - Permanentní magnet |
| 3 - Kruh rotorové klece | 7 - Jho 2 rotoru |
| 4 - Zuby rotoru | 8 - Hřídel |

4.2 Sestavení rovnic tepelného výpočtu

Z navržené tepelné sítě je nutné stanovit matice pro tepelný výpočet dle vzorce

$$\mathbf{P} = \mathbf{G} \cdot \vartheta, \quad (4.1)$$

kde matici celkových tepelných toků \mathbf{Q} reprezentuje matice tepelných ztrát \mathbf{P} . Pro výpočet jsou známy velikosti ztrát a jednotlivých vodivostí. Matice tepelných vodivostí \mathbf{G} má velikost 8×8 , jelikož síť obsahuje 8 uzlů

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} G_1 & -g_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -g_{12} & G_2 & -g_{23} & -g_{24} & -g_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -g_{23} & G_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -g_{24} & 0 & G_4 & -g_{45} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -g_{25} & 0 & -g_{45} & G_5 & -g_{56} & -g_{57} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -g_{56} & G_6 & -g_{67} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -g_{57} & -g_{67} & G_7 & -g_{78} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -g_{78} & G_8 \end{pmatrix}. \quad (4.2)$$

Členy hlavní diagonály G_i jsou dány součtem všech vodivostí vstupujících do uzlu

$$G_1 = g_{1o2} + g_{12},$$

$$G_2 = g_{12} + g_{23} + g_{24} + g_{25} + g_{2o1},$$

$$G_3 = g_{23} + g_{3o2},$$

$$G_4 = g_{24} + g_{45} + g_{4o2} + g_{4o2} + g_{4o1},$$

$$G_5 = g_{25} + g_{45} + g_{56} + g_{57} + g_{5o2} + g_{5o2},$$

$$G_6 = g_{56} + g_{67} + g_{6o2} + g_{6o2},$$

$$G_7 = g_{57} + g_{67} + g_{78} + g_{7o2} + g_{7o2},$$

$$G_8 = g_{78} + g_{8o2} + g_{8o2} + g_{8o3} + g_{8o3}.$$

Matice tepelných ztrát \mathbf{P} je pro tento případ určena jako

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} P_1 + g_{1o2} \cdot \vartheta_{o2} \\ P_2 + g_{2o1} \cdot \vartheta_{o1} \\ P_3 + g_{3o2} \cdot \vartheta_{o2} \\ P_4 + g_{4o1} \cdot \vartheta_{o1} + g_{4o2} \cdot \vartheta_{o2} \\ P_5 + 2 \cdot g_{5o2} \cdot \vartheta_{o2} \\ P_6 + 2 \cdot g_{6o2} \cdot \vartheta_{o2} \\ P_7 + 2 \cdot g_{7o2} \cdot \vartheta_{o2} \\ P_8 + 2 \cdot g_{8o2} \cdot \vartheta_{o2} + 2 \cdot g_{8o3} \cdot \vartheta_{o3} \end{pmatrix}, \quad (4.3)$$

ovšem nenulovými členy ztrát jsou pouze ztráty P_2 a P_6 . Ztráty P_2 reprezentují celkové ztráty v drážkách $P_{j2} = 105,9 \text{ W}$ a P_6 jsou určeny celkovými ztrátami v PM

$P_m = 20,2$ W. Tyto ztráty byly určeny elektromagnetickým výpočtem. Platí pro ně vztahy

$$P_{j2} = q_d \cdot S_{vr} \cdot l_{Fe}, \quad (4.4)$$

$$P_m = q_m \cdot Q_3 \cdot h_m \cdot b_m \cdot l_{Fe}, \quad (4.5)$$

kde q_d jsou objemové ztráty v drážkách [$W \cdot m^{-3}$], q_m jsou objemové ztráty v magnetu [$W \cdot m^{-3}$], Q_3 počet magnetů v rotoru, h_m výška magnetu [m], b_m šířka magnetu [m], S_{vr} značí průřez drážek rotoru [m^2], l_{Fe} délku rotorového svazku [m]. Z těchto vztahů je potřebné určit objemové ztráty, které budou využity pro další výpočty prováděné v programu Ansys.

Pro tepelný výpočet jsou dále uvažovány hodnoty jednotlivých měrných tepelných vodivostí:

- měrná tepelná vodivost materiálu vinutí statoru $\lambda_1 = 384$ W·m⁻¹·K⁻¹,
- měrná tepelná vodivost materiálu klece $\lambda_2 = 200$ W·m⁻¹·K⁻¹,
- měrná tepelná vodivost materiálu magnetu $\lambda_3 = 7,6$ W·m⁻¹·K⁻¹,
- tepelná vodivost plechů rotoru v radiálním směru $\lambda_{Fe2r} = 50$ W·m⁻¹·K⁻¹,
- tepelná vodivost plechů rotoru v axiálním směru $\lambda_{Fe2a} = 1$ W·m⁻¹·K⁻¹,
- měrná tepelná vodivost vzduchu $\lambda_e = 0,0252$ W·m⁻¹·K⁻¹.

Hřídel i rotorová klec mají ve všech směrech stejnou velikost měrné tepelné vodivosti, avšak jho rotoru má v axiálním směru tepelnou vodivost o mnoho horší než ve směru radiálním. To je způsobeno tím, že rotor je složen z jednotlivých plechů, které jsou od sebe navzájem izolovány tenkou vrstvou laku. Tato vrstva je i dobrý tepelný izolant, což pro potřeby chlazení motoru není úplně vhodné. Uvažovaný činitel plnění železa rotoru k_{Fe2} je pro tento výpočet roven 1.

Do výpočtu jsou také zadány součinitele přestupu tepla jednotlivých částí. Součinitel přestupu tepla drážky rotoru $\alpha_{dr} = 1000$ W·m⁻²·K⁻¹ a součinitel přestupu tepla pro hřídel-plechy rotoru $\alpha_{pr} = 200$ W·m⁻²·K⁻¹.

Hodnoty teplot jednotlivých okolí jsou $\vartheta_{o1} = 30$ °C, $\vartheta_{o2} = 50$ °C a $\vartheta_{o3} = 20$ °C. Součinitele přestupu tepla do těchto okolí pak $\alpha_1 = 60$ W·m⁻²·K⁻¹, $\alpha_2 = 50$ W·m⁻²·K⁻¹ a $\alpha_3 = 20$ W·m⁻²·K⁻¹. Teplota ϑ_{o1} reprezentuje teplotu vzduchové mezery, ϑ_{o2} vnitřní vzduch motoru a ϑ_{o3} teplotu okolí.

Nyní už jsou známy hodnoty matice tepelných ztrát \mathbf{P} a matice tepelných vodivostí \mathbf{G} . Můžeme tedy vyjádřit matici výsledných teplot $\boldsymbol{\vartheta}$ z rovnice 4.1 jako

$$\boldsymbol{\vartheta} = \mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{P}. \quad (4.6)$$

Po provedení výpočtu je matice teplot rovna

$$\vartheta = \begin{pmatrix} \vartheta_{\text{Kruhklece}} \\ \vartheta_{\text{Tyčeklece}} \\ \vartheta_{\text{Kruhklece}} \\ \vartheta_{\text{Zuby}} \\ \vartheta_{\text{Jho1}} \\ \vartheta_{\text{Magnet}} \\ \vartheta_{\text{Jho2}} \\ \vartheta_{\text{Hřidel}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 75,7 \\ 75,9 \\ 75,7 \\ 75,2 \\ 75,9 \\ 78,9 \\ 76,0 \\ 73,8 \end{pmatrix}. \quad (4.7)$$

Z výsledků je patrné, že nejnižší střední teplota je na hřídeli, odkud je teplo odváděno do nejnižší okolní teploty. V rotorové kleci je teplota tyčí o 0,2 °C vyšší než teplota kruhů rotorové klece. Zjednodušeně můžeme uvažovat, že teplota rotorové klece je ve všech částech stejná a k ověření funkčnosti sítě nemusí být prozatím kruhy rotorové klece uvažovány. Obě části jha rotoru mají téměř stejnou teplotu, mírně vyšší je teplota jha 2 rotoru, které je blíže ke hřídeli. Nejvyšší teplotu mají ovšem permanentní magnety. Oproti teplotě jha rotoru je zde teplota vyšší o cca 2 °C. V tomto případě to není vysoké oteplení, ovšem při jiných počátečních podmínkách by mohl být rozdíl více patrný. Jelikož jsou v našem případě magnety uloženy uvnitř rotoru, je znemožněno jejich chlazení a odvod tepla je ve větší části uskutečňován pouze do jha rotoru.

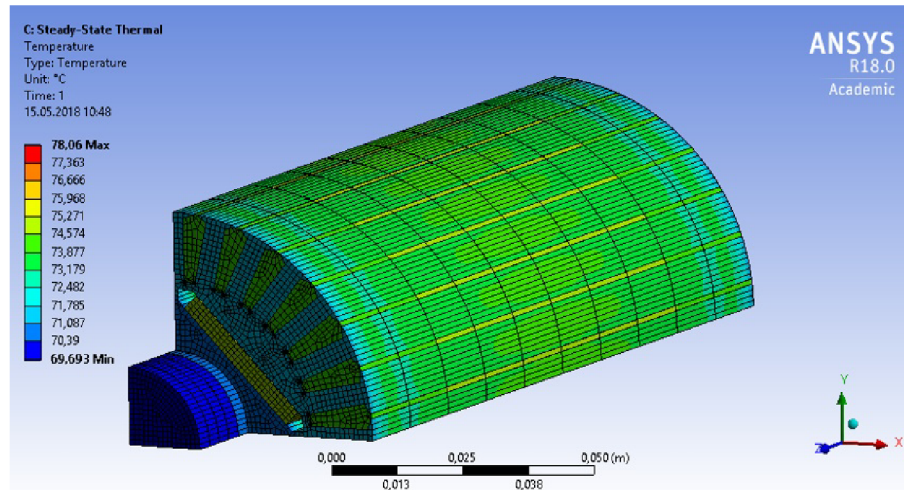
4.3 Ověření funkčnosti tepelné sítě rotoru pomocí programu Ansys

4.3.1 Metoda konečných prvků

Program Ansys využívá pro výpočty metodu konečných prvků (FEM - Finite element method). Ta je využívána k simulaci průběhů různých veličin na vytvořeném modelu. Tato metoda může být využita v řadě odvětví. V našem případě nám model vytvořený pomocí metody konečných prvků může poskytnout poměrně přesný průběh rozložení teploty v motoru na vytvořeném modelu. Tato metoda je využívána díky své vhodnosti k řešení složitějších problémů, které nelze řešit analyticky, např. složitých geometrických tvarů. Zakládá se na rozdělení modelu na určité množství vrstev (prvků). Spojité prostředí je tedy nahrazeno diskrétním modelem a teplota je určována vždy v jednotlivých uzlových bodech. Ve výsledku je použit výpočet rovnic pomocí iterační metody. [12]

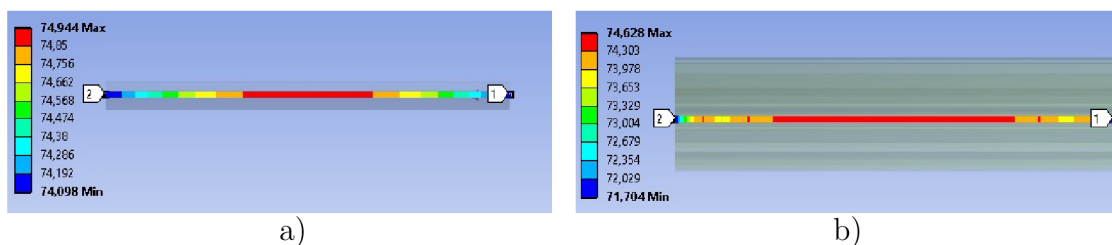
4.3.2 Rotor LSPMSM v programu Ansys Workbench

Pro ověření funkčnosti navržené tepelné sítě rotoru bylo využito výpočtu v ustáleném tepelném stavu. Do modelu byly zadány stejné okrajové podmínky jako u programu počítajícího tepelnou síť. Přestup tepla do okolí je zde zadán pouze prouděním. Pro zrychlení výpočtů bylo využito symetrie rotoru a byla vymodelována jen jeho čtvrtina.

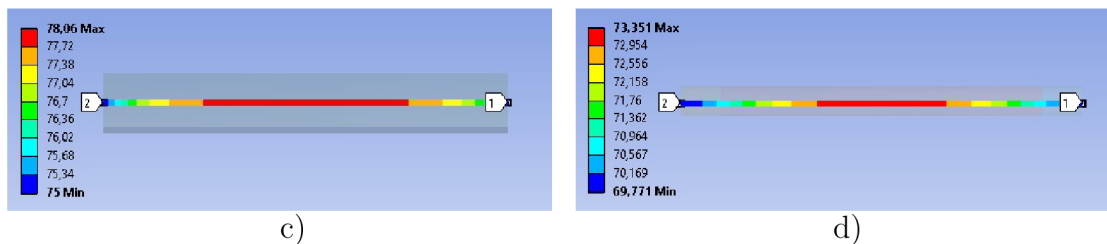


Obr. 4.3: Rozložení teploty na povrchu rotoru

Z obr. 4.3 je patrné pouze rozložení teploty na povrchu částí, odkud je situován přestup tepla do okolních teplot. Tyto části jsou tedy nejchladnější. Nejnižší teplotu má, stejně jako v předchozím výpočtu, část hřídele v okolním vzduchu. Lze vidět, že nejvyšší teplotou bude opět teplota permanentního magnetu. Avšak povrchové teploty nejsou dostatečně vypovídající, proto je potřeba sledovat průběhy teplot uvnitř jednotlivých částí. Z nich mohou být určena nejvíce tepelně namáhaná místa rotoru. V našem případě jsou zkoumány průběhy teplot v závislosti na délce uvnitř tyče rotorové klece, jha rotoru, permanentního magnetu a hřídele (viz obr. 4.4 a 4.5).



Obr. 4.4: Průběh teploty v závislosti na délce a) tyče rotorové klece, b) jha rotoru



Obr. 4.5: Průběh teploty v závislosti na délce c) permanentního magnetu, d) hřídele

Všechny sledované části mají parabolický průběh teploty s maximem ve středu součásti a směrem ke kraji teplota klesá. Maximální hodnota je pro nás v tuto chvíli nejdůležitější. V tyči rotorové klece je teplota v celé délce téměř konstantní a směrem od středu klesá rovnoměrně. Celkový rozdíl teplot je zde necelý 1 °C. Jelikož kruhy rotorové klece mají téměř stejnou teplotu, jako tyče rotorové klece, nebyly v tomto modelu uvažovány. U jha rotoru má dlouhý úsek ve středu rotoru teplotu konstantní a prudký pokles lze sledovat až u čel rotoru. Nejvyšší teplota je zjištěna u permanentního magnetu $\vartheta_{\max} = 78,1$ °C, což souhlasí s výpočtem tepelné sítě.

Tab. 4.1: Porovnání výsledných teplot rotoru

Uzel sítě	Název	$\vartheta_{\text{Tep.sít}} [^{\circ}\text{C}]$	$\vartheta_{\text{Ansys(max)}} [^{\circ}\text{C}]$
1	Teplota kruhu rotorové klece	75,7	x
2	Teplota tyče rotorové klece	75,9	74,9
3	Teplota kruhu rotorové klece	75,7	x
4	Teplota zubů rotoru	75,2	74,1
5	Teplota jha 1 rotoru	75,9	74,6
6	Teplota permanentního magnetu	78,9	78,1
7	Teplota jha 2 rotoru	76,0	75,1
8	Teplota hřídele	73,8	73,4

V tab. 4.1. jsou vypsány všechny vypočtené teploty. Je patrné, že hodnoty vypočtené pomocí tepelné sítě jsou vyšší než maximální hodnoty modelu analyzovaného pomocí programu Ansys Workbench. Rozložení teploty rotoru LSPMSM je stejné u obou výpočtových metod. Maximální odchylka hodnot činí 1,3 %, tudíž se navržená tepelná síť dá považovat za funkční a může být využita pro další výpočty. Rozdíly mezi výslednými hodnotami mohou být dány chybami metod, nebo některými zjednodušujícími předpoklady.

5 VÝSLEDNÁ TEPELNÁ SÍŤ LSPMSM

Vzhledem k tomu, že již máme ověřené tepelné sítě všech částí motoru, může být sestavena tepelná síť pro motorový celek a vypočteno jeho oteplení. Funkčnost tepelné sítě LSPMSM bude opět ověřena v programu Ansys.

5.1 Tepelná síť LSPMSM

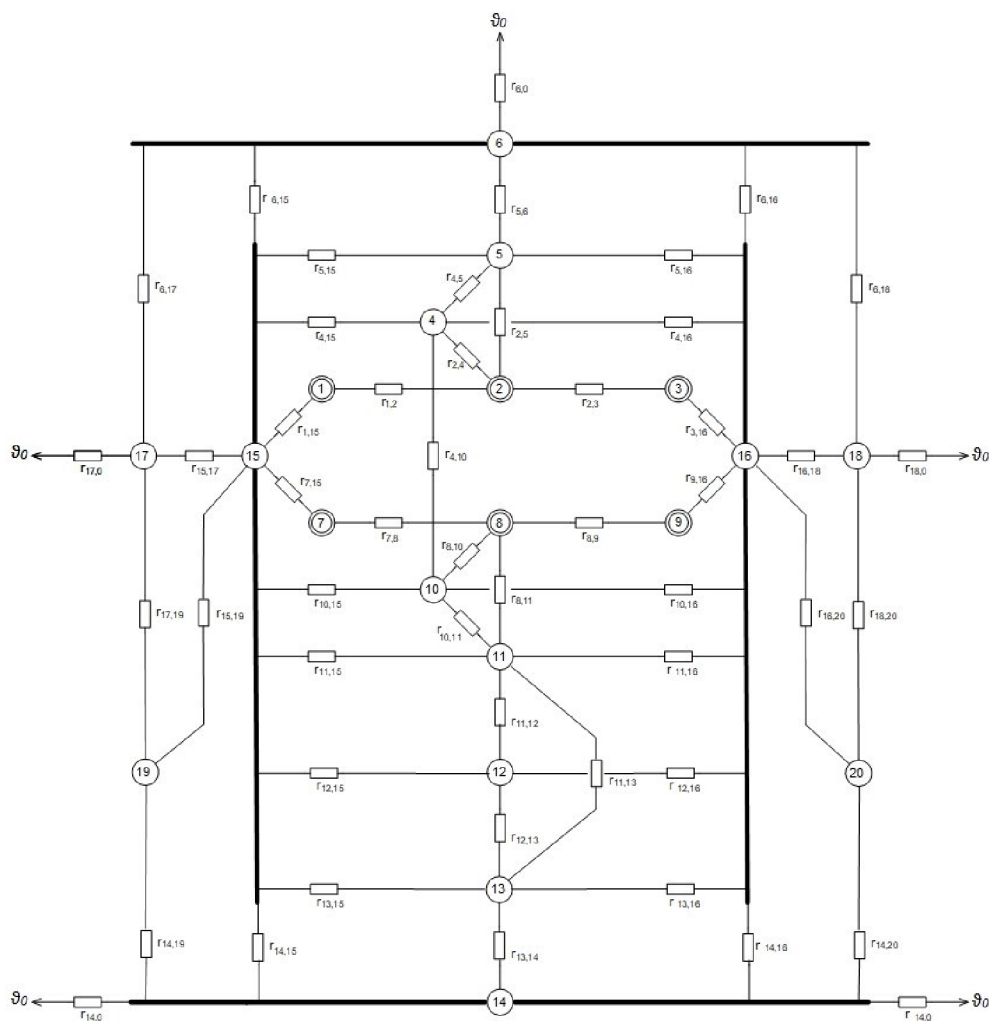
Celková tepelná síť LSPMSM (viz obr. 5.1) se skládá ze statorové části asynchronního motoru a rotorové části LSPMSM. Je zde vycházeno z asynchronního motoru o výkonu 1,5 kW, IP54 s vlastním povrchovým chlazením a třídou izolace vinutí F. Jsou využity jeho geometrické rozměry i fyzikální parametry. Síť je sestavena tak, aby reprezentovala motor včetně všech dílčích částí jako jsou například ložiskové štíty či kostra motoru. Oproti síti asynchronního motoru jsou zde přidány uzly sítě reprezentující ložiska (uzly **19** a **20**). Uzly této sítě jsou přechíslovány dle motorového celku, nekorespondují tudíž s čísly uzlů ostatních zde uvedených sítí.

Aby byl model reálný, je u vinutí statoru, statorových a rotorových plechů, zadán také činitel plnění. Ten zohledňuje rozdíl objemu plechů, či vodičů s celkovým objemem jednotlivých částí. Koeficient plnění železa statoru $k_{Fe1} = 0,93$ a koeficient plnění železa rotoru $k_{Fe2} = 0,9$. Koeficient plnění mědi je vypočten jako podíl objemu vodičů v drážce ku objemu drážky statoru. V modelu je uvažována teplota okolí $\vartheta_o = 40$ °C, pro kterou je udáván nominální výkon motoru. Měrné tepelné vodivosti rotoru jsou stejné, jako v předchozím případě. Pro ostatní části motoru jsou zadány

- měrná tepelná vodivost materiálu kostry $\lambda_k = 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,
- měrná tepelná vodivost ložiskového štítu $\lambda_s = 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,
- tepelná vodivost plechu statoru v radiálním směru $\lambda_{Fe1r} = 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,
- tepelná vodivost plechu statoru v axiálním směru $\lambda_{Fe1a} = 1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Součinitele přestupu tepla lze z měrných tepelných vodivostí vypočíst dle rovnice 3.6.

Z uvedené tepelné sítě jsou dle podmínek uvedených v kapitole 4.2 sestaveny matice potřebné pro výpočet teplot jednotlivých uzlů. Kvůli jejich rozsáhlosti zde ovšem uvedeny nebudou. Matice vodivostí \mathbf{G} je o velikosti 20x20. Jednotlivé tepelné vodivosti sítě jsou vypočteny z upravených vzorců ze [17].



Obr. 5.1: Tepelná síť LSPMSM

Význam jednotlivých uzlů sítě

- | | | |
|-----------------------------|-------------------------|---------------------|
| 1 - Čelo vinutí statoru | 8 - Tyče rotorové klece | 15 - Vnitřní vzduch |
| 2 - Vinutí v drážce statoru | 9 - Kruh rotorové klece | 16 - Vnitřní vzduch |
| 3 - Čelo vinutí statoru | 10 - Zuby rotoru | 17 - Zadní štít |
| 4 - Zuby statoru | 11 - Jho 1 rotoru | 18 - Přední štít |
| 5 - Jho statoru | 12 - Permanentní magnet | 19 - Ložisko |
| 6 - Kostra | 13 - Jho 2 rotoru | 20 - Ložisko |
| 7 - Kruh rotorové klece | 14 - Hřídel | |

Tab. 5.1: Výsledné teploty LSPMSM

Uzel	Část	ϑ [°C]	Uzel	Část	ϑ [°C]
1	Čelo vinutí statoru	71,7	11	Jho rotoru 1	66,0
2	Vinutí v drážce statoru	67,5	12	Permanentní magnet	66,8
3	Čelo vinutí statoru	71,7	13	Jho rotoru 2	65,9
4	Zuby stator	67,6	14	Hřídel	63,6
5	Jho statoru	67,2	15	Vnitřní vzduch	65,9
6	Kostra	62,7	16	Vnitřní vzduch	65,9
7	Kruh rotorové klece	66,7	17	Zadní štítu	58,2
8	Tyče rotorové klece	66,6	18	Přední štítu	58,2
9	Kruh rotorové klece	66,7	19	Ložisko	58,4
10	Zuby rotoru	66,7	20	Ložisko	58,4

V tabulce 5.1 jsou uvedeny výsledné hodnoty teplot LSPMSM. V tomto výpočtu byly již zahrnuty všechny části a proto by výsledky měli být blíže skutečným hodnotám oteplení LSPMSM. Nejvyšší teplota je dle předpokladu na čelech vinutí statoru, $\vartheta_1 = 71,7$ °C. U třídy izolace vinutí F je povoleno oteplení vinutí 105 °C. Celková teplota vinutí může v této třídě dosáhnout teploty 155 °C při trvalém chodu motoru. U výpočtu LSPMSM je střední teplota vinutí statoru méně než polovina povolené teploty vinutí.

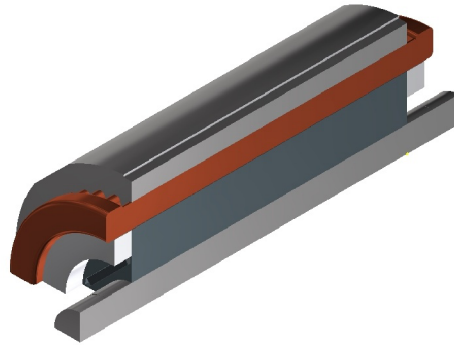
Pro LSPMSM je rozhodující i teplota permanentních magnetů. Vypočtená hodnota teploty PM $\vartheta_{12} = 66,8$ °C. Při této teplotě nedojde k velkému zhoršení parametrů těchto magnetů, remanentní indukce B_r se dle [8] sníží o 6 % a koerzivní síla H_C o 21 %. Teplota magnetů je nižší než 80 °C, proto je vhodné tyto magnety využít. Při teplotě do 80 °C mají magnety NdFeB lepší parametry než SmCo.

5.2 Ověření funkčnosti tepelné sítě pomocí programu Ansys

5.2.1 Geometrie motoru

Pro simulaci rozložení teploty v určitých částech motoru byla nejprve vytvořena geometrie LSPMSM v programu Autodesk Inventor (viz obr. 5.2). Model obsahuje pouze stator, rotor a hřídel, ostatní části ve výpočtu zahrnuty nebudou. Stator se skládá ze statorových plechů, statorového vinutí a kruhů reprezentujících čela vinutí statoru o stejném objemu, jako je objem čel vinutí daného motoru. Rotor obsahuje

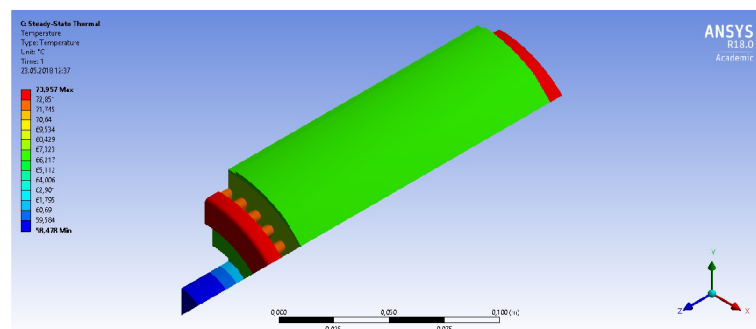
rotorové plechy, 4 permanentní magnety, tyče a kruhy rotorové klece. Díky možnosti využití symetrie motoru mohla být opět vymodelována pouze čtvrtina motoru.



Obr. 5.2: Geometrie LSPMSM

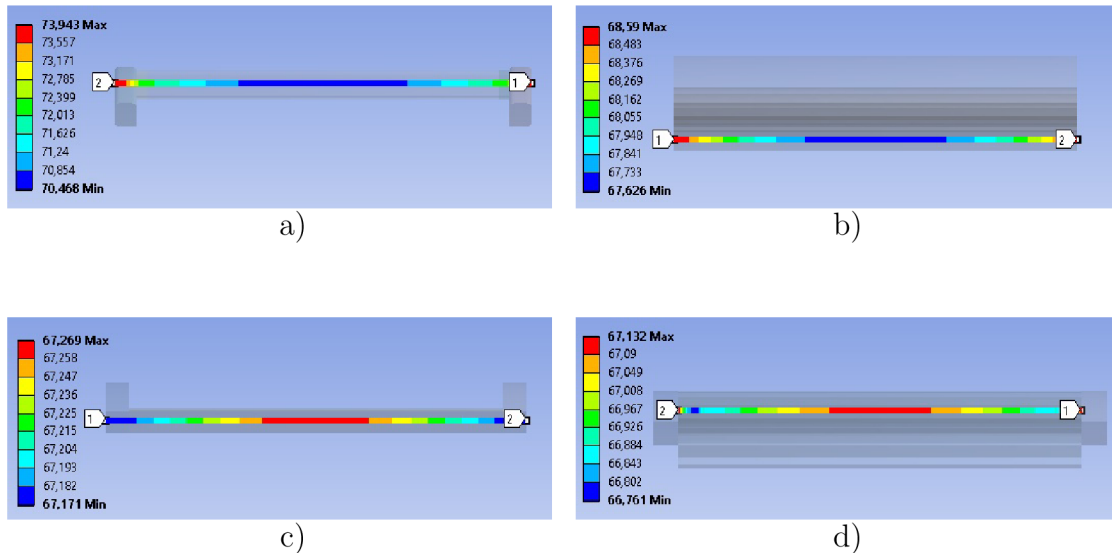
5.2.2 LSPMSM v programu Ansys Workbench

I přesto, že byla vymodelována pouze čtvrtina rotoru, je možné ji ještě rozdělit napůl. Vznikne tak pouhá osmina motoru, která za použití symetrie vytvoří motor celý. To velice usnadní a urychlí výpočet v programu Ansys. Jelikož model motoru neobsahuje vnější části motoru, je využito vypočtených teplot těchto částí pomocí tepelné sítě. Okolní teploty jsou poté nastaveny na teploty vypočtené. Například z povrchu statoru je odváděno teplo do kostry; v našem případě tedy do teploty okolí, která je rovna vypočtené teplotě kostry. Jelikož každá část má jiný součinitel přestupu tepla do okolí, musí být některé části rozděleny. Například hřídel je rozdělena na 3 části: část uvnitř motoru, odkud je teplo odváděno do rotoru, díl ve vnitřním vzduchu a část odvádějící teplo do okolního prostředí. Takto je postupováno u všech částí. Okrajové podmínky modelu jsou zde stejné jako u výpočtu pomocí tepelné sítě. Celkové rozložení teplot motoru je zobrazeno na obr. 5.3



Obr. 5.3: Rozložení teploty v LSPMSM

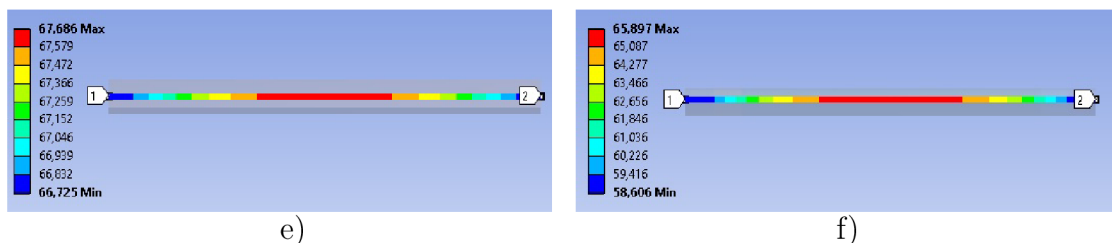
Z obr. 5.3 je patrné, že nejvyšší teplota je v čelech vinutí a nejnižší na části hřídele, která je v okolním vzduchu. Z celkového modelu ovšem není patrné detailní rozložení teplot uvnitř jednotlivých částí motoru, což znesnadňuje vyhodnocení. Vybrané detailní průběhy jsou proto zobrazeny na obr. 5.4. Jedná se o teplotu ve vinutí statoru, v zubech statoru, v rotorové kleci a v zubech rotoru.



Obr. 5.4: Průběhy teplot LSPMSM v závislosti na délce a) vinutí statoru s čely, b) zubu statoru, c) rotorové klece s kruhy, d) zubu rotoru

Z daných průběhů je patrné parabolické rozložení teploty. U statorové části je ve středu teplota nejnižší a směrem k čelům vinutí se zvyšuje. Teplota jha rotoru je téměř stejná, jako teplota zubu statoru, tzn. že i její průběh v závislosti na délce bude podobný. V rotorové části je tomu stejně; teplota jha 1 rotoru odpovídá teplotě zubu rotoru. Teplota jha 2 rotoru je nižší a proto není nutné zde její průběh uvádět. V rotoru je maximální teplota ve středu jednotlivých částí. Celkově nejvyšší teplota je v čelech vinutí statoru.

Pro celkový přehled o rozložení teplot uvnitř motoru jsou dále zkoumány průběhy teplot v permanentním magnetu a ve hřídeli (viz obr. 5.5)



Obr. 5.5: Průběh teploty v závislosti na délce a) permanentního magnetu, b) hřídele

Z permanentního magnetu je uskutečňován odvod tepla převážně do jha rotoru, a proto jsou průběhy těchto částí téměř stejné. Tepelně nejnamáhanější je střed permanentního magnetu, tzn., že zde bude i největší riziko zhoršení jeho parametrů. Z rozložení teploty v hřídeli jsou patrné jednotlivé její části. Nejchladnější část je v okolním prostředí, část s teplotou okolo 61 °C ve vnitřním vzduchu. Zbylá část, kde je teplota nejvyšší, je uložena uvnitř rotoru.

Tab. 5.2: Porovnání výsledných teplot LSPMSM

Uzel sítě	Název	$\vartheta_{\text{Tep.sít}} [^{\circ}\text{C}]$	$\vartheta_{\text{Ansys}} [^{\circ}\text{C}]$
1	Teplota čela vinutí statoru	71,7	74,0
2	Teplota vinutí v drážce statoru	67,5	70,5
3	Teplota čela vinutí statoru	71,7	74,0
4	Teplota zubů statoru	67,6	68,6
5	Teplota jha statoru	67,2	68,7
7	Teplota kruhu rotorové klece	66,7	67,2
8	Teplota tyčí rotorové klece	66,6	67,3
9	Teplota kruhu rotorové klece	66,7	67,2
10	Teplota zubů rotoru	66,6	67,1
11	Teplota jha rotoru 1	66,0	67,3
12	Teplota permanentního magnetu	66,8	67,7
13	Teplota jha rotoru 2	65,9	66,7
14	Teplota hřídele	63,6	65,9

V tabulce 5.2 jsou uvedeny všechny střední hodnoty teplot LSPMSM vypočtené v Ansysu a jim odpovídající teploty vypočtené metodou tepelné sítě. V tomto případě jsou nižší teploty vypočtené analyticky. Rozdíl těchto teplot je nejvíce patrný u vinutí statoru, respektive u jeho čel. Oteplení je zde vyšší o 3,3 °C, což by na vinutí rotoru nemělo větší vliv. Permanentní magnet s teplotou $\vartheta_{12} = 67,7$ °C by měl sníženou B_r o cca 6% a H_c o 22%. Oproti výpočtům v tepelné síti se nejedná o významný rozdíl. Vzhledem k malým rozdílům teplot mezi modelem tepelné sítě a modelem v Ansysu můžeme navrženou tepelnou síť považovat za plně funkční.

6 ZÁVĚR

První část semestrální práce je zaměřena na studii synchronního motoru s permanentními magnety a klecí nakrátko umožňující přímý rozběh ze sítě (LSPMSM). Bylo zjištěno, že LSPMSM by mohl díky svým výhodným parametrům nahradit malé asynchronní motory. Je možné, že v závislosti na vysoké efektivitě provozu bude i přes vysoké výrobní náklady ve výsledku ekonomičtější než asynchronní motor. Při snížení nákladů na permanentní magnety a dalším rozvoji ve výrobě by mohl být tento motor na trhu velmi žádaný.

Oteplení elektromotorů je velkým problémem. Motor musí být navržen tak, aby při zatížení jmenovitým výkonem jeho oteplení nepřesáhlo maximální dovolenou hodnotu. Oteplení lze vypočítat pomocí různých metod. V této práci byla využita metoda analytická, konkrétně metoda tepelných sítí. Tato metoda spočívá ve vytvoření tepelné sítě přesně popisující jednotlivé části motoru a tepelných odporů mezi nimi. V práci je uvedena tepelná síť pro asynchronní motor v provedení IP44 s klecí nakrátko, žebrovanou kostrou a bez vnitřního oběhu vzduchu. Z této sítě vychází návrh tepelné sítě LSPMSM.

U LSPMSM je stator totožný se statorem asynchronního motoru, liší se pouze rotor. Ten obsahuje 4 permanentní magnety typu NdFeB. Bylo proto nutné nejprve navrhnout tepelnou síť rotoru LSPMSM nezávisle na motorovém celku. Její funkčnost byla ověřena pomocí tepelné simulace ustáleného stavu v programu Ansys. Síť lze tedy považovat za plně funkční.

Tepelná síť LSPMSM byla vytvořena nahrazením rotorové části v tepelné síti asynchronního motoru tepelnou sítí rotoru LSPMSM. V návrhu je vycházeno z asynchronního motoru o výkonu 1,5 kW, IP54 s vlastním povrchovým chlazením a třídou izolace vinutí F. Byly využity jeho geometrické i fyzikální parametry. Funkčnost této sítě byla ověřena také výpočtem v programu Ansys.

Tepelně nejnamáhanější částí motoru jsou čela vinutí statoru, což odpovídá teoretickým předpokladům. Jejich nejvyšší teplota je rovna 71,7 °C. Nežádoucí je i oteplení permanentních magnetů, které může zhoršit jejich parametry. V tomto případě dojde ke zhoršení remanentní indukce B_r o 6 % a koercitivní síly H_c o 22 %. Snížení oteplení motoru by bylo možné využitím nuceného oběhu vzduchu, tzn. přidáním ventilátoru.

LITERATURA

- [1] ELISTRATOVA, Vera. *Optimal design of line-start permanent magnet synchronous motors of high efficiency*. Ecole Centrale de Lille, 2015. Dostupné také z: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01308575>
- [2] MODEER, Tomas. *Modeling and Testing of Line Start Permanent Magnet Motors*. Stockholm, Sweden, 2007. ISBN 978-91-7178-749-1. Licentiate Thesis. School of Electrical Engineering, KTH.
- [3] MEHRJOU, Mohammad Rezazadeh, Norman MARIUN, Norhisam MISRON, Mohd Amran MOHD RADZI a Suleiman MUSA. Broken Rotor Bar Detection in LS-PMSM Based on Startup Current Analysis Using Wavelet Entropy Features. *Applied Sciences* [online]. 2017, **7**(8) [cit. 2017-11-21]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2076-3417/7/8/845/htm>
- [4] HASSANPOUR ISFAHANI, Arash a Sadegh VAEZ-ZADEH. Line start permanent magnet synchronous motors: Challenges and opportunities. *Energy*. Elsevier, 2009, **34**(11), 1755 - 1763. ISSN 0360-5442. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.022>.
- [5] *Elektrické stroje*. Brno. Skripta předmětu Elektrické stroje (BESB). Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [6] CHAMA, A. a A. J. SORGDRAGER R-J WANG. Synchronization criteria of line-start permanent magnet synchronous motors: a revisit. In: *24th Southern African Universities Power Engineering Conference* [online]. Vereeniging, South Africa, 2016 [cit. 2017-12-28]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/291957599>
- [7] Table of Properties for SmCo Magnets. *Total Magnetic Solutions* [online]. USA [cit. 2017-12-05]. Dostupné z: <http://www.magnetsales.com/smco/smcoprops.htm>
- [8] N35UH: Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets. In: *Arnold Magnetic Technologies* [online]. New York, 2018 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.arnoldmagnetics.com/products/neodymium-iron-boron-magnets/>
- [9] DEEB, Ramia. *Thermal calculations of Permanent Magnet Motors in high current technology*. Brno, 2013, 94 s. PhD thesis. Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication. Vedoucí práce Prof. RNDr. Vladimír Aubrecht, CSc.

- [10] Sm2Co17 Demagnetization Curve YX 30A. In: *Yuxiang Magnetic Materials* [online]. 2010 [cit. 2017-12-05]. Dostupné z: <http://www.x-magnet.net/hard-magnet/Sm2Co17-Demagnetization-Curve-YX-30A.html>
- [11] Doc. Ing. LÁZNIČKOVÁ, Ilona, Ph.D. *Technická mechanika: Mechanika poddajných těles Termomechanika*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, VUT v Brně, 2014, 140 s.
- [12] NATEGH, Shafigh. *Thermal Analysis and Management of High-Performance Electrical Machines*. Stockholm, Sweden, 2013. ISBN 978-91-7501-733-4. Doctoral Thesis. KTH School of Electrical Engineering.
- [13] Doc. Dr. Ing. PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky, svazek I: Teplené jevy, činný výkon*. Brno, 2005. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky.
- [14] ŠPÉROVÁ, Alice. *Thermal calculation of rotational electrical machines using thermal network*. Brno, 2010, 101 s. PhD thesis. Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communication. Vedoucí práce Doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
- [15] Bc. TOMAN, Marek. *Vázané modelování asynchronního motoru metodou fyzikálního modelování*. Brno, 2015, 63 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Radek Vlach, Ph.D.
- [16] Ing. TOMAN, Marek. *Řízení asynchronního motoru s ohledem na účinnost při činnosti v širokém rozsahu otáček a momentu*. Brno, 2017, 36 s. Pojednání o dizertační práci. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Vorel, Ph.D.
- [17] Ing. HYNŠT, Radomil a Drahomíra NEČASOVÁ. *Výpočet chlazení asynchronního motoru nakrátko, provedení IP44 s žebrovanou kostrou, bez vnitřního oběhu vzduchu*. Výzkumný ústav elektrických strojů, Brno, 1969, 126 s.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

Použité symboly a zkratky

ILSPMSM	Interior Magnet Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor
LSPMSM	Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor
NdFeB	Neodym-Železo-Bór
PM	Permanentní magnety
SLSPMSM	Surface Magnet Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor
SmCo	Samarium-Kobalt

Použité veličiny

B_r	Remanentní indukce
b_m	Šířka magnetu
\mathbf{G}	Matice tepelných vodivostí
g_θ	Tepelná vodivost
$\text{grad } T$	Gradient teploty
H_c	Koercitivní síla
h	Tloušťka rovinné stěny
h_m	Výška magnetu
k_{Fe1}	Koeficient plnění železa statoru
k_{Fe2}	Koeficient plnění železa rotoru
l	Délka
l_{Fe}	Délka svazku
M	Intenzita vyzařování
M_{celk}	Celkový moment
M_{klece}	Moment vyvolaný klecovou kotvou
M_{mag}	Brzdný moment
M_z	Zátěžný moment
\mathbf{P}	Matice tepelných ztrát
P_{j2}	Celkové ztráty v drážkách rotoru
P_m	Ztráty v permanentním magnetu
Q	Teplo
\dot{Q}	Celkový tepelný tok
\mathbf{Q}	Matice celkových tepelných toků
Q_3	Počet magnetů v rotoru
q	Hustota tepelného toku
\mathbf{q}	Vektor hustoty tepelného toku
q_d	Objemové ztráty v drážkách
q_m	Objemové ztráty v magnetu

R	Elektrický odpor
R_{ϑ}	Tepelný odpor
S	Plocha
S_{vr}	Průřez drážek rotoru
T	Termodynamická teplota
U	Elektrické napětí
α	Součinitel přestupu tepla
α_{dr}	Součinitel přestupu tepla drážky rotoru
α_{pr}	Součinitel přestupu tepla pro hřídel-plechy rotoru
α_x	Součinitel přestupu tepla do okolí
$\Delta\vartheta$	Oteplení
ε	Spektrální emisivita
ϑ	Teplota
$\boldsymbol{\vartheta}$	Matice neznámých teplot
ϑ_{ox}	Teplota okolí
λ	Měrná tepelná vodivost
λ_{Ag}	Měrná tepelná vodivost stříbra
λ_{Al}	Měrná tepelná vodivost hliníku
λ_{Cu}	Měrná tepelná vodivost mědi
λ_e	Tepelná vodivost vzduchu
λ_{Fe1a}	Tepelná vodivost plechů statoru v axiálním směru
λ_{Fe1r}	Tepelná vodivost plechů statoru v radiálním směru
λ_{Fe2a}	Tepelná vodivost plechů rotoru v axiálním směru
λ_{Fe2r}	Tepelná vodivost plechů rotoru v radiálním směru
λ_k	Měrná tepelná vodivost materiálu kostry
λ_s	Měrná tepelná vodivost materiálu štítu
λ_1	Měrná tepelná vodivost materiálu vinutí statoru
λ_2	Měrná tepelná vodivost materiálu klece
λ_3	Měrná tepelná vodivost materiálu magnetu
ρ	Měrný elektrický odpor
ρ_{ϑ}	Měrný tepelný odpor
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta
φ_1, φ_2	Elektrický potenciál