

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2024

Petr Jiroušek



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

TEPELNÁ ANALÝZA ASYNCHRONNÍHO STROJE POMOCÍ METODY TEPELNÉ SÍTĚ.

THERMAL ANALYSIS OF INDUCTION MACHINE USING THERMAL NETWORK METHOD.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Jiroušek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Světlík

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Petr Jiroušek

ID: 240751

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Tepelná analýza Asynchronního stroje pomocí metody tepelné sítě.

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte literární rešerši jednotlivých typů asynchronních strojů.
2. Nastudujte a popište způsoby přenosu tepla a jejich vliv na oteplení stroje.
3. Navrhněte tepelnou síť a popište princip této metody.
4. Vypočítejte teploty jednotlivých částí asynchronního stroje
5. Výsledky okomentujte

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Heat and mass transfer – Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar
- [2] Design of rotating electrical machines – Juha Pyrhönen, Tapani Jokinen, Valéria Hrabovcová
- [3] Thermal analysis of high-speed induction machines – Juha Saari

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 29.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Martin Světlík

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

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 zabývá tepelnou analýzou asynchronního motoru. V první části je rozebrán princip jeho funkce a možné konstrukční provedení. Druhá část pojednává o mechanismech způsobů šíření tepla, kterými jsou vedení, proudění a záření. Další kapitola je věnována popisu metody tepelné sítě a obsahuje navrženou síť pro konkrétní asynchronní motor. Čtvrtá kapitola zahrnuje rovnice tepelných odporů a jejich popis společně se zjednodušením geometrie stroje. V páté stěžejní kapitole jsou definované vstupní parametry výpočtu a hlavně vypočtené teploty uzlů tepelné sítě.

KLÍČOVÁ SLOVA

asynchronní motor, metoda tepelné sítě, klec nakrátko

ABSTRACT

This paper deals with the thermal analysis of an induction motor. In the first part the principle of its function and possible design are discussed. The second part discusses the mechanisms of heat transfer methods, which are conduction, convection and radiation. Next chapter is devoted to the description of the thermal network method and contains the designed network for a specific induction motor. The fourth chapter includes the thermal resistance equations and their description together with a simplification of the machine geometry. The fifth key chapter defines the input parameters of the calculation and mainly the calculated temperatures of the nodes of the thermal network.

KEYWORDS

induction motor, thermal network method, squirrel cage

JIROUŠEK, Petr. Tepelná analýza Asynchronního stroje pomocí metody tepelné sítě. [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-29]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159806>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Martin Světlík.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Petr Jiroušek
VUT ID autora: 240751
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2023/24
Téma závěrečné práce: Tepelná analýza Asynchronního stroje pomocí metody tepelné sítě.

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 bakalářské práce panu Ing. Martinu Světlíkovi za lidský přístup, konstruktivní kritiku a cenné rady při tvorbě mé práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině za dlouholetou trpělivost a velkou podporu.

Obsah

Úvod	12
1 Asynchronní stroj	13
1.1 Princip	13
1.2 Režimy práce	13
1.3 Konstrukce	15
1.4 Využití	17
1.5 Náhradní schema	19
1.6 Ztráty ve stroji	19
2 Způsoby přenosu tepla	22
2.1 Proudění	22
2.1.1 Turbulentní a laminární proudění	23
2.1.2 Součinitel přestupu tepla	24
2.1.3 Nusseltovo číslo	24
2.2 Vedení	24
2.2.1 Tepelná vodivost a tepelný odpor	25
2.2.2 Měrná tepelná kapacita	25
2.3 Sálání	26
3 Metoda tepelné sítě	28
3.1 Sestavení matic tepelné sítě	28
3.2 Tepelně-elektrická analogie	29
3.3 Navržená tepelná síť asynchronního stroje	30
3.3.1 Definice uzlů sítě	31
4 Sestavení rovnic tepelných odporů	32
4.1 Stator	32
4.1.1 Změna geometrie drážky statoru	34
4.2 Hřídel	35
4.3 Nahrazení ekvivalentní tepelnou vodivostí	37
4.3.1 Náhrada tyčí a zubů rotoru tělesem s ekvivalentní vodivostí	38
4.4 Kostra	39
4.5 Pravý ložiskový štít	42
4.6 Levý ložiskový štít	43
4.7 Rotor	43

5	Výpočet	46
5.1	Výsledné střední teploty	46
5.2	Tepelné toky	47
5.3	Vstupní parametry	48
	Závěr	51
	Literatura	52
	Seznam symbolů a zkratk	54
A	Tabulka značení rozměrů	57

Seznam obrázků

1.1	Momentová charakteristika	14
1.2	Řezy asynchronním strojem	15
1.3	Momentová závislost pro stroj s dvojitou klecí.	17
1.4	Typické momentové křivky pro univerzální motory	18
1.5	Náhradní schema asynchronního stroje	19
1.6	Tok výkonu pro motorický režim	20
2.1	přirozená a nucená konvekce	22
2.2	Mezní vrstva	23
2.3	Turbulentní a laminární proudění	24
2.4	Vedení tepla	25
2.5	Rozdělení dopadajícího záření	26
2.6	Model absolutně černého tělesa	27
3.1	Tepelná síť asynchronního stroje v axiálním řezu	30
3.2	Tepelná síť asynchronního stroje v radiálním řezu	30
4.1	Stator	33
4.2	Tvar drážky statoru	35
4.3	Hřídel	36
4.4	Princip homogenizace	38
4.5	Homogenizace rotorové klece a zubů rotoru	38
4.6	Kostra	40
4.7	Ložiskový štít pravý	42
4.8	Ložiskový štít levý	43
4.9	Rotor	44

Seznam tabulek

3.1	Tepelně elektrická analogie	29
5.1	Střední teploty částí stroje	46
5.2	Tepelné toky do okolí	47
5.3	Tepelné toky ve stroji	48
5.4	Ztráty ve stroji	48
5.5	Činitele plnění	49
5.6	Hodnoty důležitých rozměrů	49
5.7	Součinitele tepelné vodivosti	50
5.8	Součinitele přestupu tepla	50

Úvod

Elektrické stroje jsou již dlouhé desítky let využívány v téměř veškerých technických odvětvích i běžných domácnostech. Na tyto motory jsou kladeny vysoké nároky z hlediska jejich vysoké účinnosti a nízkých výrobních nákladů. Asynchronní stroje mají všechny zmíněné vlastnosti a proto jsou vhodným adeptem pro využití v širokém spektru aplikací.

Moderní doba klade požadavky na co nejmenší rozměry, zejména z důvodů snahy o šetření množství používaných materiálů a snižování hmotnosti strojů. Zmenšování strojů ústí ve zvyšování výkonové hustoty a stroje mají tendenci se při práci více zahřívat. Vysoká teplota v elektrických strojích může znamenat nejen vyšší opotřebení nebo degradaci, ale i zhoršení vlastností materiálů a tím snížení efektivity. Aby nedocházelo k negativním vlivům a defektům částí, které jsou náchylné na vysokou teplotu (např. izolace) je třeba stroje dimenzovat pro udržení teploty v pracovních mezích. Za účelem této dimenzace je nutné znát tepelné poměry ve stroji, které lze získat prostřednictvím fyzického měření nebo tepelné analýzy. Pro realizaci měření je ovšem třeba vyrobit prototyp, který může být velmi nákladný. Vysoké ekonomické náklady na výrobu prototypů lze ušetřit při využití dále popisované metody tepelné sítě. Při dostatečné přesnosti lze docílit odchylek teplot v jednotkách stupňů Celsia.

Tato práce se zaměřuje na asynchronní stroje a detailně rozebírá princip jejich fungování a konstrukci. Dále se zabývá způsoby přestupu tepla, přesněji konvekcí, kondukcí a radiací. Dále popisuje metodu tepelné sítě pro tepelné výpočty a představuje konkrétní tepelnou síť navrženou pro asynchronní stroj s klecí nakrátko. Stěžejní částí práce je popis tepelných odporů v tepelné síti a výpočet středních teplot v uzlech.

1 Asynchronní stroj

Tato kapitola pojednává o asynchronním stroji. Informuje o principu, konstrukci a vytvářených ztrátách.

1.1 Princip

Asynchronní nebo také indukční stroj je elektrické zařízení, které slouží k přeměně elektrické energie na mechanickou, případně opačně. V současné době je jeho nejvíce rozšířené konstrukční provedení s klecí na krátko, které je též nejčastěji využívaný elektrický stroj. Díky vlastnostem jako spolehlivost, jednoduchost konstrukce a snadná údržba [1]. Při napájení statorového vinutí střídavým napětím, dochází k tvorbě točivého magnetického pole a indukci proudu do rotoru. Indukovaný proud reaguje s magnetickým polem a vzniká tak moment síly, který roztáčí rotor. Proud ve vodiči se indukuje pouze při změně velikosti magnetického pole, proto při dosažení stejné mechanické rychlosti rotoru a rychlosti točivého magnetického pole statoru nedochází k relativní změně velikosti magnetického pole v rotorovém vinutí, tedy neteče proud a nevzniká moment. Tento stav je ovšem pouze teoretický, jelikož mechanické ztráty třením o vzduch a v ložiscích nedovolí rotoru bez vnějšího pohonu této rychlosti dosáhnout. Pokud budeme tuto rychlost sledovat pomocí otáček za minutu, lze tento stav popsat jako synchronní otáčky, které odpovídají otáčkám točivého magnetického pole generovaného statorem n_s [2], [3]. Zpoždění mechanických otáček vůči otáčkám magnetického pole statoru se nazývá skluz a podle [2] je definováno jako

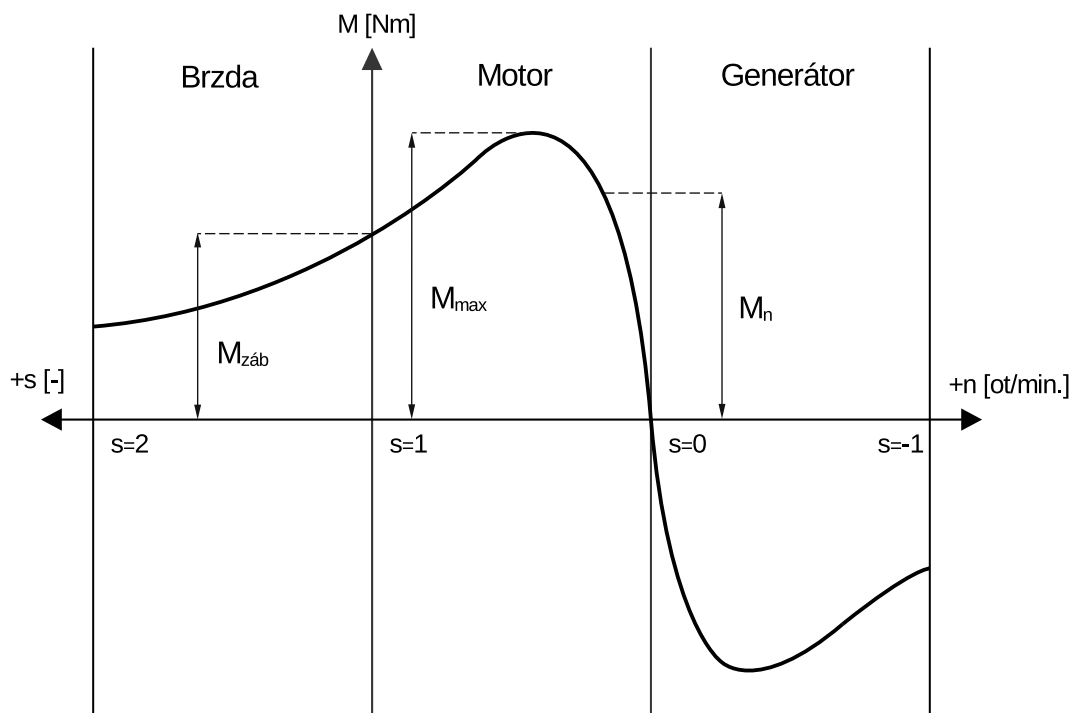
$$s = \frac{n_s - n}{n_s}, \quad (1.1)$$

kde n_s jsou otáčky magnetické pole statoru a n_r definuje mechanické otáčky rotoru.

1.2 Režimy práce

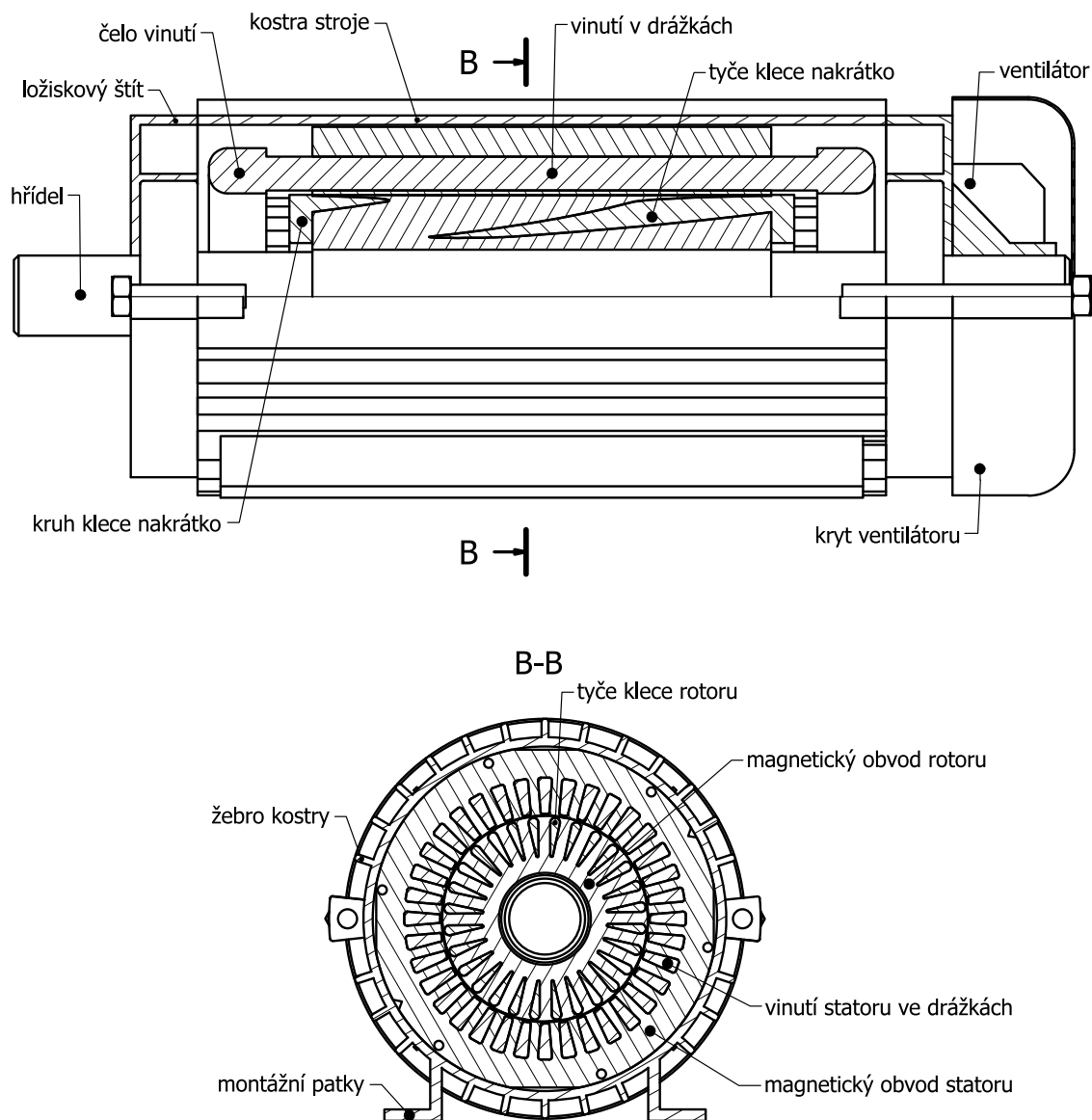
S pomocí skluzu jsme schopni definovat tři stavy ve kterých se může stroj při provozu nacházet. Těmito stavy jsou brzda, motor a generátor, které lze vidět na obrázku 1.1. V oblasti brzdy se skluz pohybuje v hodnotách od dvou do jedné a otáčky rotoru jsou záporné. Pro porovnání si jej můžeme představit jako brzdění v autě. V tomto režimu je elektrická energie spotřebovávána k brzdění. Následuje motorická oblast, ve které se skluz pohybuje od 1 do 0 a otáčky v rozmezí 0 až n_s . Stroj spotřebovává elektrickou energii pro pohyb rotoru, což je možné si představit, jako sešlápnutí plynového pedálu v autě. Pro generátorický režim jsou typické otáčky

vyšší než synchronní a záporný skluz. Stroji je dodávána mechanická energie, která je převáděna na elektrickou [4], [1]. Ta je následně přes svorky vyvedena až do místa spotřeby. Tento proces lze demonstrovat na dynamu používaném na jízdním kole k napájení světel.



Obr. 1.1: Momentová závislost na skluzu/otáčkách [1]

1.3 Konstrukce



Obr. 1.2: Řezy asynchronním strojem

Asynchronní stroj v axiálním částečném řezu a úplném radiálním řezu je vyobrazen na obr. 1.2. Stroj se skládá ze statorového vinutí, které bývá nejčastěji třífázové. Lze se ovšem setkat i se zařízeními, které mají pět nebo více fází [6]. Používají se též motory napájené z jedné fáze, nejčastěji varianty se stíněným pólem nebo s pomocnou fází. První možnost využívá závitů na krátko který je umístěn v pólech a při tvorbě magnetického pole statoru se v něm indukuje proud, který tvoří fázový posun části magnetického pole, což způsobuje vznik momentu. Alternativa využívá kondenzátor zapojený sériově k pomocnému vinutí pro posun pomocné fáze oproti

hlavní fázi [7].

Ve statorové části dále nalezneme magnetický obvod složený z feromagnetických plechů o tloušťkách desetin až jednotek milimetrů. Pokud by byl feromagnetický obvod z jednoho kusu, ztráty vířivými proudy by činily motor velmi neefektivním. Mezi zuby statorového plechu se vkládá vinutí, jehož jednotlivé fáze bývají rozděleny do několika drážek. Drážek mohou být po obvodu desítky.

Kostra motoru chrání jeho vnitřní části před poškozením nebo vniknutím mechanických nečistot a napomáhá jeho chlazení. Využití kovových slitin je výhodné, jelikož mají dobrou tepelnou vodivost a mechanickou pevnost. Kostra bývá na povrchu zvrásněná nebo z ní vystupují žebra, která fungují jako pasivní chladič. Pro zvýšení chladicího efektu je možné statorovými plechy vést kapalně nebo plynně chladiivo [9]. Kostra nese také svorkovnici, díky které jsme schopni jej napájet a měnit jeho zapojení, obvykle do hvězdy nebo trojúhelníka. Změnou zapojení je možné měnit rozběhové parametry jako jsou např. záběrný proud $I_{záb}$ nebo záběrný moment $M_{záb}$ [7]. Na kostře se nachází také štítek s technickými údaji, mezi které patří počet fází m , pracovní frekvence f , jmenovité napětí U a proud I pro zapojení do trojúhelníku a do hvězdy, počet otáček za minutu n , jmenovitý výkon P a účinník $\cos \varphi_f$.

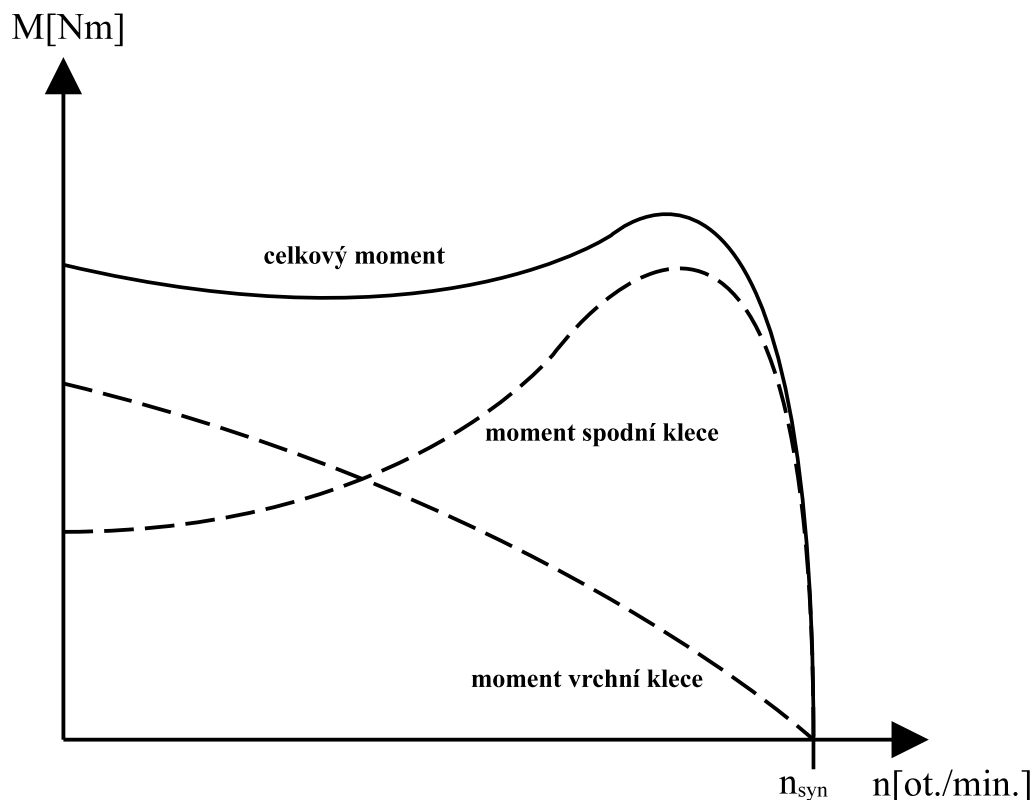
Statorovou a rotorovou část spojují ložiska, která zabezpečují snadné otáčení při minimalizaci tření. Běžně jsou používána kuličková nebo v případě velkého radiálního zatížení válečková. Pro vysokootáčkové stroje zmíněné typy nevyhovují, proto se používají ložiska magnetická nebo kluzná, u kterých je mezi vnější a vnitřní kroužek vháněna tekutina [6]. Ložiska jsou ukotvena v ložiskovém štítu, který je aretuje na místě a chrání před vnějšími vlivy.

Rotor se skládá z hřídele, ventilátoru, a rotorového vinutí. Hřídel je vyráběná z oceli a slouží pro přenos kroutícího momentu a mechanického výkonu. Součástí rotoru je ventilátor sloužící pro vznik proudění vzduchu motorem a tím zefektivnění jeho chlazení. Existuje několik provedení rotoru. Vinutý rotor má konce vinutí vyvedené na tzv. kroužky na venkovní straně hřídele. Připojováním odporů jsme schopni měnit vlastnosti motoru při rozběhu. Zvyšováním odporu zvyšujeme záběrný moment a snižujeme záběrný proud, který může bez připojené impedance nabývat až 8 násobků jmenovitého proudu motoru. Během rozběhu snižujeme odpor až do dosažení nominálních otáček. Poté je impedance odpojena a kroužky jsou zkratovány [7].

Častějším provedením je klec nakrátko. Sestává se z hliníkových tyčí vylévaných do drážek plechů nebo měděných tyčí vkládaných do těchto drážek. Tyče jsou na obou stranách zkratované pomocí kruhů. Klec může být jednoduchá, nebo dvojitá. Ta se skládá ze spodní klece umístěné hlouběji od povrchu rotoru a vrchní klece, blíže povrchu [4].

Jak můžeme vidět na obr. 1.3 horní klec dodává nejvíce momentu při rozběhu a

v pásmu otáček blížících se k synchronním klesá k nule, stejně jako ztráty v té samé kleci. Průběh u spodní klece se podobá průběhům strojů vybavených jednoduchou klecí. Spojením charakteristik dostáváme průběh, který netrpí nedostatkem momentu při rozběhu a současně ho má dostatek v oblasti před synchronními otáčkami [7].



Obr. 1.3: Momentová závislost pro stroj s dvojitou klecí.

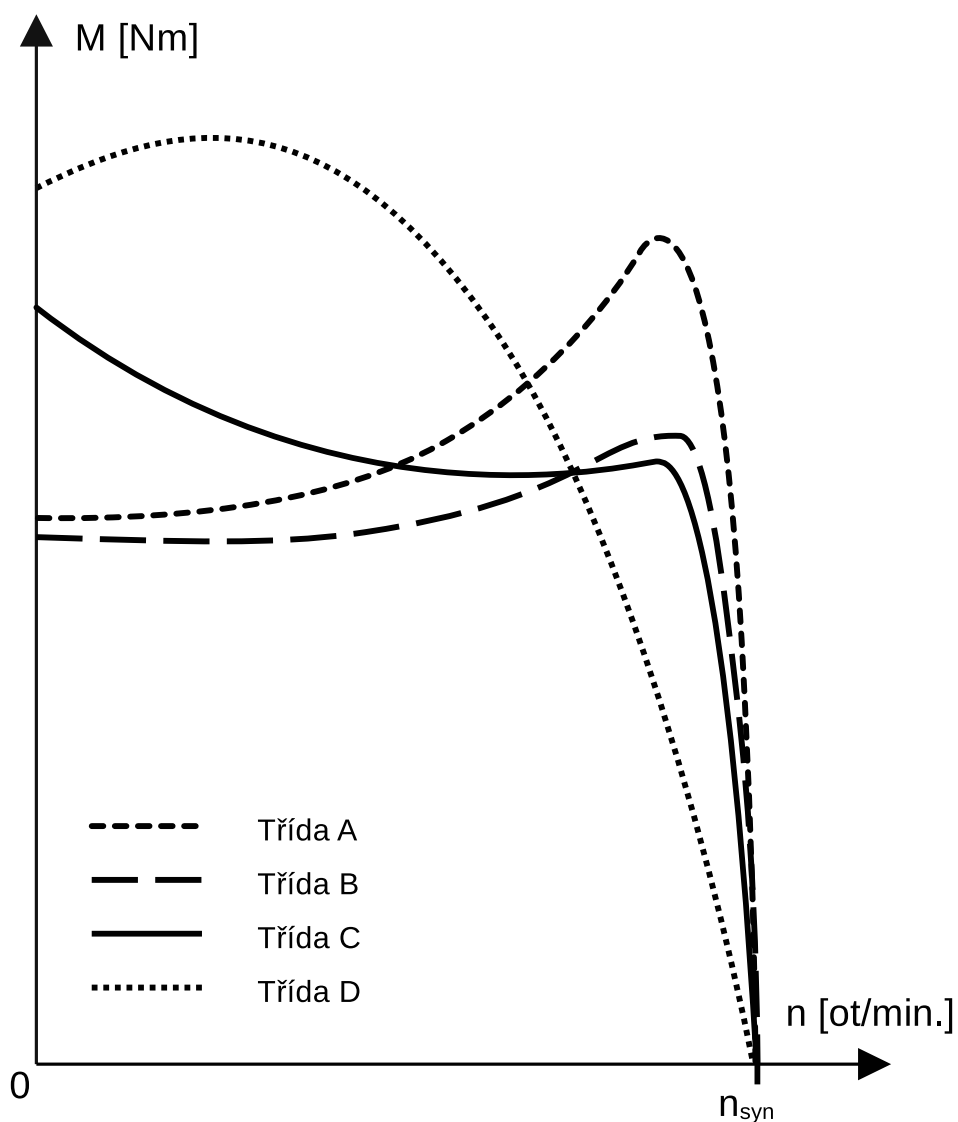
1.4 Využití

Asynchronní stroje jsou hojně využívány po celém světě, prakticky v každém odvětví vyžadujícím elektrický pohon, ale i alternátor. Lze je najít v běžných domácnostech, kupříkladu kuchyňské spotřebiče nebo nástroje pro zpracování dřeva. Dále v průmyslu a technické výrobě, nebo dopravních prostředcích jako jsou osobní automobily, vlaky a letadla [8]. Dle požadavků při startování a běhu volíme nejvýhodnější návrh.

Na obr. 1.4 je možné vidět čtyři nejběžnější průběhy momentové charakteristiky motorů s klecí nakrátko. Třída D je vhodná pro aplikace s častým spouštěním a rázovým namáháním, jelikož nejvyššího momentu dosahuje v relativně nízkých otáčkách, ovšem pracuje s velkým skluzem. Třída C má též vysoký záběrný moment,

ale pracovní skluz je menší a díky tomu se hodí jako pohon pro ventilátory nebo dopravníky. Pro třídu A a B je charakteristický malý pracovní skluz a poměrně vysoká účinnost. Kategorie B oproti A vyniká v nižším záběrném proudu, což je ovšem vykoupeno nižším momentem [4].

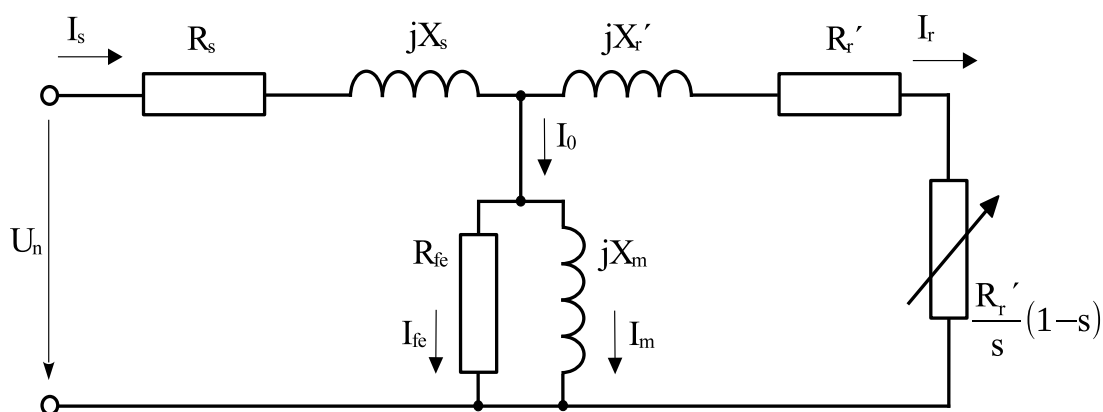
Nicméně v dnešní době se od složitějších klecí ustupuje, jelikož jejich výroba je nákladná a využívá se spojení jednoduché klece a frekvenčního měniče.



Obr. 1.4: Typické momentové křivky pro univerzální motory, inspirováno [4]

1.5 Náhradní schema

Na obr. 1.5 lze vidět náhradní schema asynchronního stroje. Při tvorbě ekvivalentního schématu, které je definováno pro jednu fázi stroje, se vychází z náhradního obvodu transformátoru, který má schema téměř stejné a liší se pouze v přidaném proměnném odporu rotoru. Ten reprezentuje elektrický výkon proměněný na mechanický a závisí na velikosti skluzu [7]. R_s značí elektrický odpor vinutí statoru, zatímco R_r' je přepočtená hodnota elektrického odporu rotoru. jX_s a jX_r' zastává rozptylovou reaktanci statoru a přepočtenou hodnotu reaktance rotoru. R_{Fe} představuje odpor charakterizující ztráty v železe a jX_m je magnetizační reaktance. Zmíněné parametry je možné vypočítat z měření naprázdno, nakrátko a měření stejnosměrného odporu rotorového vinutí. Při měření nakrátko zjišťujeme impedance vinutí, tedy parametry podélné větve. Stroj je mechanicky zablokovan, aby nedošlo k otáčení rotoru a byla splněna podmínka, že skluz je rovný jedné. Testem naprázdno získáváme informace o velikosti budícího proudu a ztrátách třením. Oproti testu nakrátko vyžaduje skluz rovný nule, čehož je dosaženo pomocí externího zařízení, které otáčí strojem synchronní rychlostí [4], [5]. Pokud není třeba dosáhnout vysoké přesnosti, dostačuje když jsou otáčky blízko synchronních a není třeba externího zařízení.



Obr. 1.5: Náhradní schema asynchronního stroje, podle [4]

1.6 Ztráty ve stroji

Jelikož asynchronní stroj slouží k přeměně energie, je důležité aby se přeměnilo její vysoké procento na požadovanou formu, tedy je třeba vysoké účinnosti η , kterou

definujeme podle [4] jako

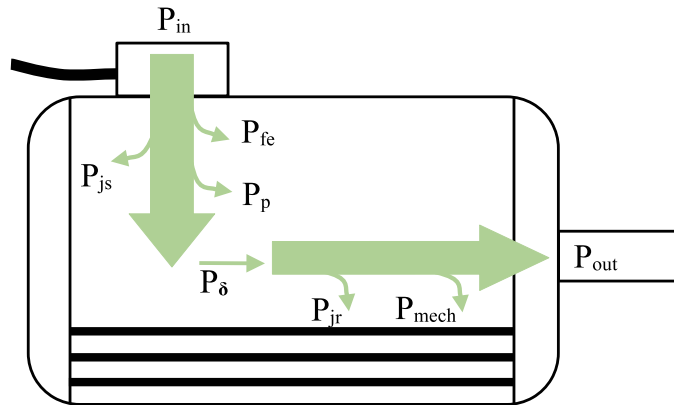
$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}, \quad (1.2)$$

kde P_{out} je výkon odebraný a P_{in} je výkon dodaný.

Pomocí vstupního a výstupního výkonu jsme schopni vyjádřit ztráty ve stroji ΔP jako jejich rozdíl a současně jako suma jednotlivých ztrát jak můžeme vidět v rovnici dle [2]. Jednotlivé ztráty u asynchronního stroje a jejich rozdělení je možné vidět na obrázku 1.6.

$$\Delta P = \Delta P_{j1} + \Delta P_{\text{Fe}} + \Delta P_{\text{d}} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{\text{mech}}, \quad (1.3)$$

Skládají se z ΔP_{j1} , které značí jouleovy ztráty ve statoru, ΔP_{Fe} reprezentuje ztráty v železe, ΔP_{d} jsou dodatečné ztráty při zatížení. ΔP_{j2} jsou definovány jako jouleovy ztráty v rotoru a ΔP_{mech} představuje mechanické ztráty třením o vzduch a v ložiscích [2].



Obr. 1.6: Tok výkonu pro motorický režim, inspirováno [2]

Jouleovy ztráty vznikají průchodem proudu vodičem, který má elektrický odpor. Na velikost ztrát má vliv materiál, fyzické provedení vodičů a velikost proudu. Pro třífázový stroj tedy můžeme vypočítat ztráty ve statoru podle [1] jako

$$\Delta P_{j1} = m I_s^2 R_s, \quad (1.4)$$

kde m je počet fází statorového vinutí, I_s definuje proud tekoucí fázovým vinutím a R_s vyjadřuje odpor jedné fáze. Pro ztráty klece nakrátko lze použít obdobný vztah ve tvaru

$$\Delta P_{j2} = I_r^2 R_r, \quad (1.5)$$

kde R_r je odpor klece a I_r udává proud rotorem.

Stroj se při provozu nachází blízko synchronní rychlosti, proto je frekvence pole indukovaného v rotoru nízká. Ztráty v železe, které jsou přímo závislé na frekvenci jsou proto zanedbatelné a u asynchronního stroje se uvažují pouze ve statoru [9]. Můžeme je rozdělit do ztrát hysterezních ΔP_h a ztrát vířivými proudy ΔP_v . Z následujícího vzorce je vidět, že ztráty vířivými proudy závisí primárně na frekvenci a magnetické indukci, zatímco hysterezní hlavně na frekvenci. Ztráty lze vypočítat podle [10] jako

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_v + \Delta P_h = K_v B_{\max}^2 f^2 + K_h B_{\max}^2 f, \quad (1.6)$$

kde K_v je koeficient vířivých proudů, K_h představuje hysterezní koeficient, f vyjadřuje frekvenci a B_{\max} je maximální hodnota magnetické indukce.

Mechanické ztráty ΔP_{mech} jsou tvořené třením, konkrétně v ložiscích a o vzduch při otáčení rotoru. Nejen že vytváří teplo, které přispívá k ohřívání motoru, ale je třeba překonávat i mechanický odpor, což způsobuje nutnost nárůstu momentu. Vliv na velikost tření má drsnost materiálů ložisek a povrchu rotoru, dále rychlost proudění vzduchu, rychlost otáčení a rozměry rotoru. Pro stroje velkého a středního výkonu s ventilátorem v axiální ose dle [9] platí

$$\Delta P_{\text{mech}} = K_t \cdot \left(\frac{n_r}{1000} \right)^2 \cdot (10D_v)^3, \quad (1.7)$$

kde K_t je konstanta stroje, která závisí na průměru rotoru a počtu pólů, n jsou otáčky rotoru a D_v je vnější průměr ventilátoru.

Dodatečné ztráty při zatížení ΔP_d mohou dosahovat až jednotek procent příkonu u menších strojů. Jsou způsobeny stupňovitým průběhem magnetického napětí nebo pulsující indukci ve vzduchové mezeře a rozptylovými toky a můžeme ho definovat jako

$$\Delta P_d = \Delta P_{dN} \cdot \left(\frac{I}{I_n} \right)^2, \quad (1.8)$$

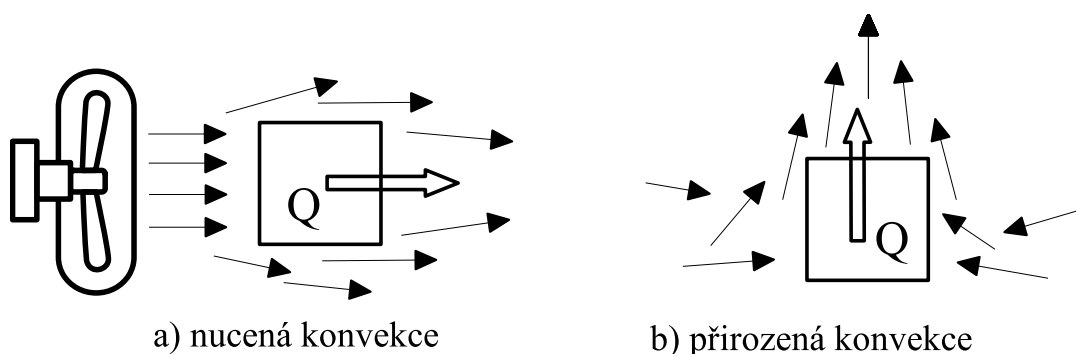
kde ΔP_{dN} definujeme dle [11] v závislosti na výkonu stroje od 0,5% (pro výkony v MW) do 3,5% (pro výkony ve stovkách W) jmenovitého výkonu stroje, I je proud tekoucí do stroje a I_n je jmenovitý proud [9].

2 Způsoby přenosu tepla

Tato kapitola se zabývá třemi základními způsoby přenosu tepla - prouděním, sáláním a vedením. Podává informace o principu fungování a elementárních výpočtech.

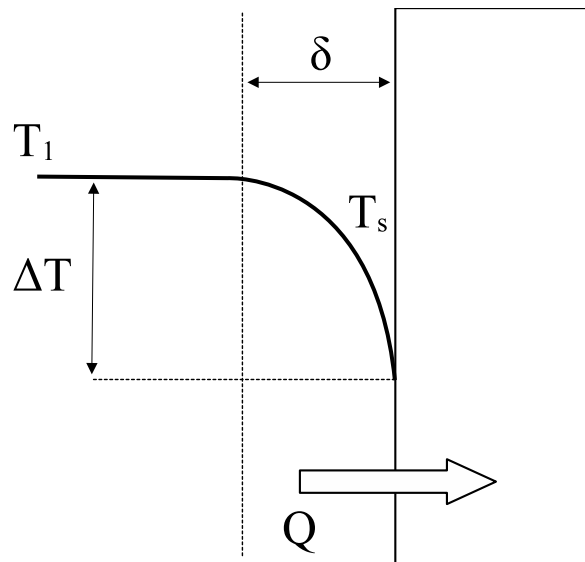
2.1 Proudění

Proudění je způsob výměny tepelné energie mezi pevnou látkou a kapalinou nebo plynem, v pohybu. Čím rychlejší je pohyb tekutiny, tím větší množství tepla je možné přenést. Proudění v sobě kombinuje efekt vedení tepla a proudění tekutiny [12]. Proudění může být samovolné (přirozené) kdy pohyb tekutiny vzniká pomocí rozdílných teplot a nebo nucené, kde je pohyb iniciován vnější silou (například čerpadlo nebo ventilátor) [13]. Na obr. 2.1 je zobrazeno těleso tvaru krychle, které má vyšší teplotu než okolní vzduch. V případě a) je ochlazováno nucenou konvekcí za pomoci zmíněného ventilátoru, v případě b) se jedná o konvekci přirozenou. Těleso předává teplo do vzduchu a ten vlivem ohřívání řídne a stoupá vzhůru, čímž odvádí teplo pryč [12]. Přirozené proudění můžeme pozorovat např. na komínu. Pokud topíme pod komínem, vzduch se ohřívá, snižuje svou hustotu a díky tomu stoupá vzhůru. Vytváří se tedy proud vzduchu od země nahoru (tzv. komínový efekt).



Obr. 2.1: přirozená a nucená konvekce, [12]

Při obtékání tělesa vzniká v jeho bezprostřední blízkosti tenká vrstva tekutiny, kterou nazýváme mezní vrstva δ . Je typická laminárním prouděním (vysvětleno dále) a vysokým gradientem teploty [13]. Na obr. 2.2 lze pozorovat gradient teploty ve vrstvě δ při předávání tepla Q prouděním z tekutiny na pevnou látku.



Obr. 2.2: Mezní vrstva [13]

Přes složitost mechanismu přestupu tepla konvekcí je vyzorováno, že míra přenosu tepla je úměrná teplotnímu rozdílu a dle [12] je vyjádřena Newtonovým zákonem chlazení jako

$$Q = \alpha S_t \cdot (T_t - T_n) \cdot t, \quad (2.1)$$

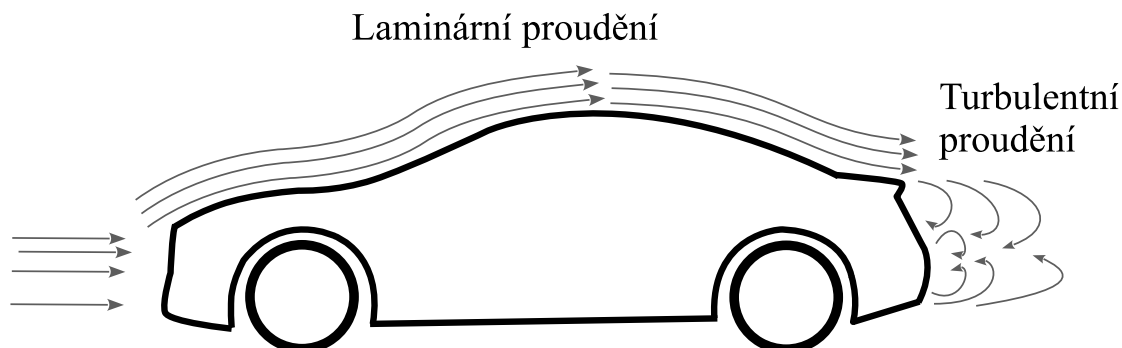
kde S_t je teplosměnná plocha, T_t značí teplotu povrchu tělesa, T_n zastává teplotu tekutiny daleko od tělesa, t je čas a α je součinitel přestupu tepla konvekcí [12].

2.1.1 Turbulentní a laminární proudění

Laminární proudění je typické pro tekutiny s vysokou viskozitou a nízkou rychlostí toku, jako jsou např. olej nebo glycerin při pokojové teplotě. Při toku skrz trubici lze pozorovat, že tekutina blízko stěny se pohybuje pomaleji než uprostřed. Naopak při turbulentním proudění je rychlost ve všech oblastech tekutiny podobná a její proudnice se mísí, což je typické pro plyny s nízkou viskozitou jako vzduch. [13] Na obrázku 2.3 lze pozorovat laminární proudění okolo karoserie auta. Za autem, kde je nižší tlak dochází k vyrovnávání tlaku a tím vzniká turbulentní proudění vzduchu. Typ proudění je určen podle Reynoldsova čísla. Pokud nabývá hodnot menších než 2300, jedná se o laminární proudění, od 10000 je turbulentní. V rozmezí těchto hodnot se jedná o přechodný stav. Reynoldsovo číslo lze stanovit dle [13] následovně:

$$Re = \frac{Lc}{v}, \quad (2.2)$$

kde c je rychlost proudění, L je průměr trubice, kterou tekutina protéká a ν je její kinematická viskozita



Obr. 2.3: Turbulentní a laminární proudění

2.1.2 Součinitel přestupu tepla

Součinitel není vlastnost materiálu a závisí na mnoha faktorech, jako jsou materiálové vlastnosti tekutiny, tvar tělesa nebo samotné proudění. Vyjadřuje množství tepla, které projde z tělesa do tekutiny nebo naopak na jednotkové ploše za určitý čas, při teplotním rozdílu 1 Kelvin [13].

2.1.3 Nusseltovo číslo

Vzhledem k tomu, že během přenosu tepla prouděním je současně aktivní i přenos vedením, Nusseltovo číslo udává zlepšení vedení tepla vlivem proudění. V situaci, kdy je veškeré teplo přenášeno pouze kondukcí je Nu rovné jedné a změnou poměru přenášeného tepla se zvyšuje. Dle [12] lze stanovit jako

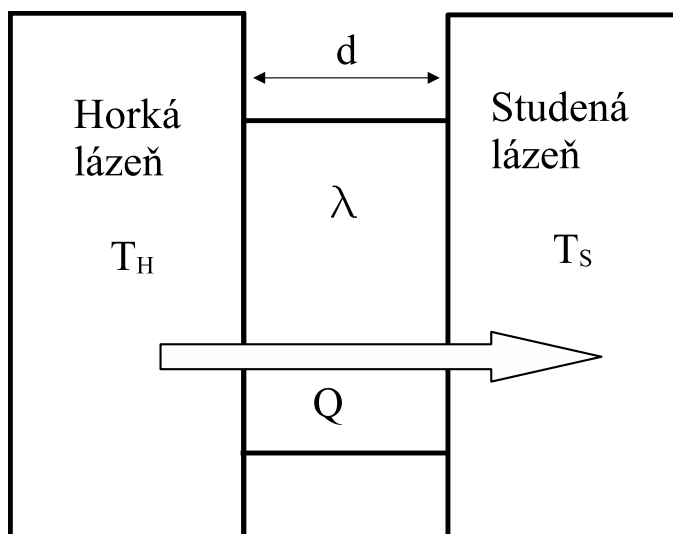
$$Nu = \frac{L\alpha}{\lambda}, \quad (2.3)$$

kde L je průměr trubice, kterou tekutina protéká, α je součinitel přestupu tepla a λ je součinitel tepelné vodivosti.

2.2 Vedení

Vedení je přenos tepla od částic s vyšší energií k částicím s energií nižší. Vyskytuje se primárně v pevných látkách, kde je přenos uskutečněn vibracemi částic v krystalické mřížce a volnými elektrony, zatímco v kapalných i plynných látkách je předávána

energie během srážek. Rychlost přenosu tepla vedením závisí na tvaru objektu, jeho tloušťce, materiálu a rozdílu teplot [12].



Obr. 2.4: Vedení tepla, inspirováno [14]

Na obr. 2.4 je možné vidět desku, která je na jedné straně ohřívána teplou lázní a na druhé straně chlazená studenou. Pokud bude její tloušťka d , teplosměnná plocha S_t , teplota horké lázně T_H a studené T_S , lze podle [14] za čas t stanovit tepelný tok jako

$$\Phi = \frac{Q}{t} = \lambda S_t \cdot \frac{T_H - T_S}{d}, \quad (2.4)$$

kde součinitel tepelné vodivosti je značen jako λ .

2.2.1 Tepelná vodivost a tepelný odpor

Tepelná vodivost je schopnost materiálu vést teplo. Vysoká tepelná vodivost je typická pro kovy, což lze pozorovat při ponoření části kovové lžičky do horkého nápoje. Lžička se od části ponořené v nápoji začne rychle oteplovat až na druhý konec, který je ve vzduchu. Vysoká tepelná vodivost zapříčinila rychlý ohřev lžičky. Měrný tepelný odpor je obrácená hodnota vodivosti [14], takže vysoká hodnota značí dobrý izolant. Patří mezi ně například dřevo, vzduch nebo oxid uhličitý [12].

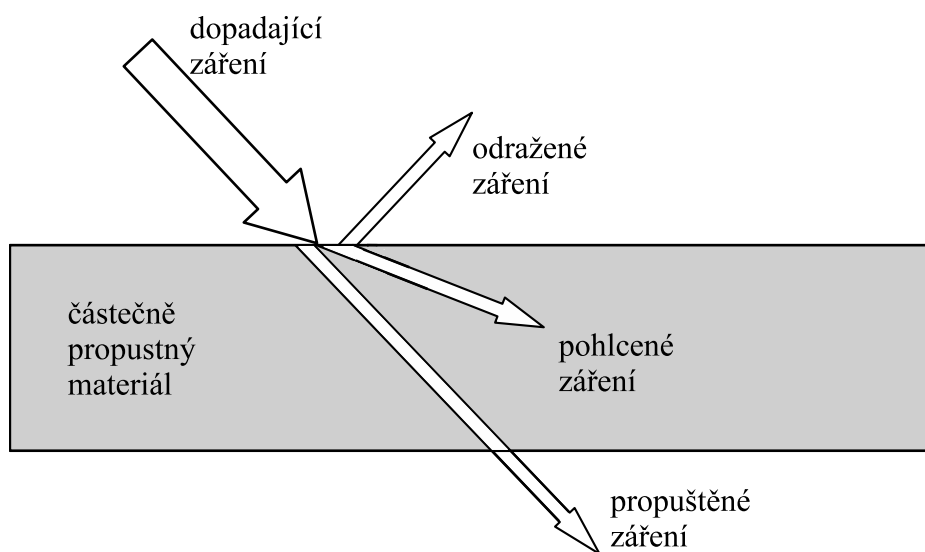
2.2.2 Měrná tepelná kapacita

Každý materiál potřebuje dodat rozdílné teplo pro zvýšení jeho teploty. Proto byla stanovena měrná tepelná kapacita c , která určuje množství tepla, která je třeba pro

ohřátí jednoho kilogramu materiálu o jeden Kelvin [14].

2.3 Sálání

Přenos sáláním se uskutečňuje prostřednictvím elektromagnetických vln, což je jediný způsob, kterým se teplo může šířit ve vakuu. Současně je to nejrychlejší způsob přenosu, jelikož záření se pohybuje rychlostí světla [12]. Každé těleso, které má vyšší teplotu než je teplota absolutní nuly, vyzařuje sáláním. Do teploty přibližně 550 stupňů Celsia není záření okem pozorovatelné, protože probíhá v oblasti infračervených vln [13].



Obr. 2.5: Rozdělení dopadajícího záření, inspirováno [12]

Těleso může nejen vyzařovat, ale i pohlcovat energii. Jak lze vidět na obr. 2.5 záření, které dopadá na povrch tělesa se dělí na tři části - odraženou, pohlcenou, která se změní na teplo a poslední část, která projde skrz látku a neinteraguje s ní. Poměr absorbované energie k dopadající se nazývá pohltivost, poměr odraženého ku celkovému je odrazivost a poměr energie, která projde látkou ku dopadající je propustnost. Jejich součet je vždy roven 1. Radiaci vyzařovanou reálným tělesem lze vyjádřit podle [14] jako

$$P_z = \varepsilon \sigma S T^4, \quad (2.5)$$

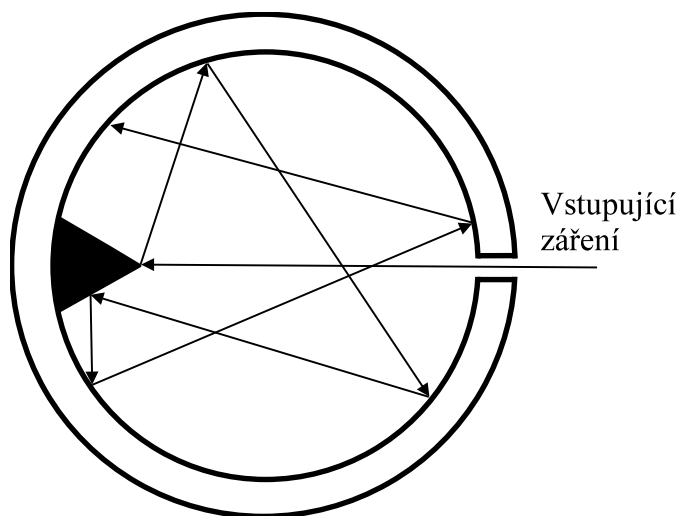
kde P_z značí výkon, kterým těleso vyzařuje, ε je emisivita povrchu tělesa, σ je Stefan-Boltzmannova konstanta, S zastává povrch tělesa a T je termodynamická teplota tělesa. Ve skutečnosti ale těleso energii nejen vyzařuje, ale i přijímá. Výkon

přenesený zářením z jednoho tělesa na druhé lze dle [14] vypočítat následovně

$$P_z = \varepsilon \sigma S \cdot (T_0^4 - T^4), \quad (2.6)$$

kde T je termodynamická teplota povrchu tělesa, pro které je počítán výkon a T_0 je termodynamická teplota povrchu tělesa přijímajícího energii. Emisivita se pohybuje v rozmezí $0 < \varepsilon < 1$ a v ustáleném stavu má hodnotu stejnou jako pohltivost. pro absolutně černé těleso je ε rovno jedné [12].

Na obázku 2.6 lze vidět model absolutně černého tělesa . Záření vstupující otvorem do tělesa se odráží od vnitřní stěny tak dlouho, dokud není zcela pohlceno, čímž je zaručena maximální pohltivost.



Obr. 2.6: Model absolutně černého tělesa, inspirováno [15]

3 Metoda tepelné sítě

Metoda využívá analogii k elektrickým obvodům, jelikož jejich analyzování je mnohem jednodušší než přímé řešení pomocí Maxwellových rovnic. Princip spočívá v geometrickém rozdělení analyzovaného objektu na dílčí části. Každou část reprezentuje uzel, o určité teplotě. Pro přesnost je tedy vhodné, aby jednotlivé fragmenty měly nízkou diferencii teplot v různých místech. Každá část, tedy i uzel je spojen s množstvím dalších uzlů(částí) mezi kterými probíhá tepelná výměna. Vzhledem k nelineárnosti teplotních průběhů v jednotlivých částech a faktu, že metoda pracuje s ustálenými hodnotami, nevystihuje teplotní maxima. V síti nejsou uvažované tepelné kapacity [16], [17].

Sít se skládá ze třech základních prvků, kterými jsou uzel, větve a nor.

- **Uzel** - definuje střední teplotu nahrazené části - mohou, ale nemusí být zdrojem tepelného toku
- **Větev** - spojuje uzly, představuje tepelná odpor/ vodivost
- **Nor** - na rozdíl od větve spojuje uzel s okolní teplotou, je skrze ně realizován odvod tepla do okolí

3.1 Sestavení matic tepelné sítě

Vztahy vychází z uzlových rovnic odvozených za pomoci Kirchhoffových zákonů. Pro řešení tepelné sítě o n uzlech je třeba vyřešit n lineárních rovnic. Pro zápis je využíváno matic.

$$\begin{pmatrix} G_1 & -g_{12} & \cdots & -g_{1n} \\ -g_{21} & G_2 & \cdots & -g_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -g_{n1} & -g_{n2} & \cdots & G_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \vdots \\ \vartheta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{01} + g_{u1}\vartheta_{u1} \\ P_{02} + g_{u2}\vartheta_{u2} \\ \vdots \\ P_{0n} + g_{un}\vartheta_{un} \end{pmatrix}, \quad (3.1)$$

Tyto matice lze vyjádřit v obecném tvaru jako

$$\mathbf{G} \cdot \boldsymbol{\vartheta} = \mathbf{P}, \quad (3.2)$$

kde \mathbf{G} je matice tepelných vodivostí, $\boldsymbol{\vartheta}$ je matice neznámých teplot a \mathbf{P} je matice tepelných toků, skládajících se z vnitřních ztrát a odvodu tepla do okolí. Řešení soustavy lineárních rovnic provádíme za pomoci inverzní matice \mathbf{G}^{-1} .

$$\boldsymbol{\vartheta} = \mathbf{G}^{-1} \cdot \mathbf{P}, \quad (3.3)$$

Po sestavení maticových rovnic následuje určení velikostí tepelných odporů z geometrických rozměrů stroje [17].

3.2 Tepelně-elektrická analogie

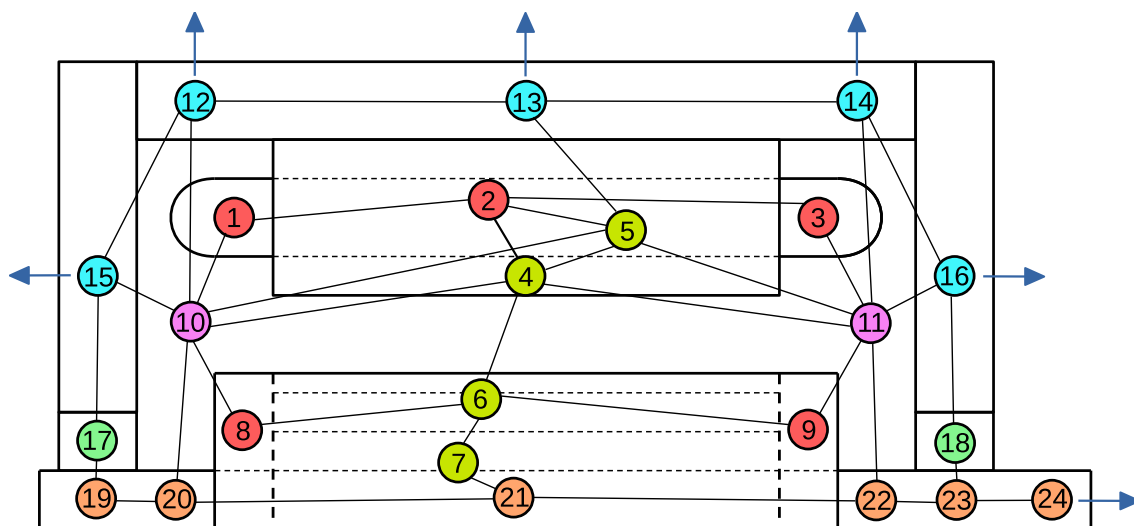
Vzhledem k tomu, že téměř všechny elektrické stroje se vlivem procházejícího proudu a případně i tření ohřívají, je tepelná analýza běžný prostředek pro zjištění teplotních poměrů ve strojích. Pro co nejsnazší řešení je užíváno přirovnání k elektrickým veličinám, které jsou řešitelům zabývající se elektrotechnikou bližší [18].

Tab. 3.1: Analogické tepelné a elektrické veličiny [18]

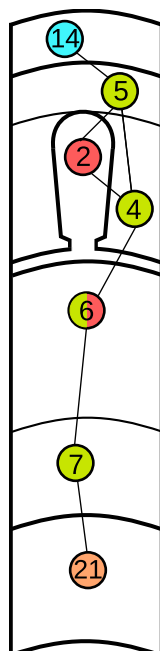
Elektrická veličina	Tepelná veličina
el. potenciál φ	termodynamická teplota T
el. náboj Q	tepelná energie W
el. napětí U $U = \varphi_2 - \varphi_1$	oteplení ΔT $\Delta T = T_2 - T_1$
el. proud I $I = \frac{Q}{t}$	tepelný tok P $P = \frac{W}{t}$
el. odpor R $R = \frac{U}{I}$	tepelný odpor R_{ϑ} $R_{\vartheta} = \frac{\Delta T}{P}$
el. kapacita C $C = \frac{Q}{U}$	tepelná kapacita C_{ϑ} $C_{\vartheta} = \frac{W}{\Delta T}$

3.3 Navržená tepelná síť asynchronního stroje

Na obr. 3.1 je vyobrazeno rozmístění 24 uzlů tepelné sítě v osovém řezu. Na obr 3.2 lze vidět pohled na tentýž stroj v řezu kolmém na osu. Šipky, které směřují ven ze stroje symbolizují "nory" a představují odvod tepla do okolí. Návrh sítě včetně počtu uzlů byl vytvořen za pomoci vedoucího práce.



Obr. 3.1: Tepelná síť asynchronního stroje v axiálním řezu



Obr. 3.2: Tepelná síť asynchronního stroje v radiálním řezu

3.3.1 Definice uzlů sítě

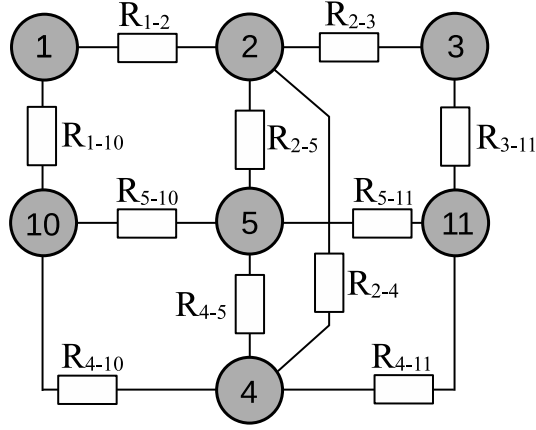
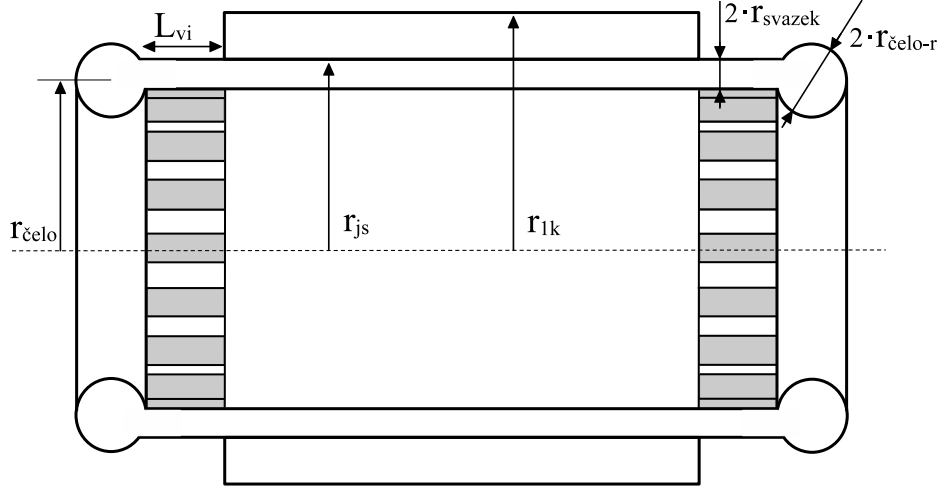
1 - čelo vinutí statoru	13 - kostra stroje
2 - statorové vinutí v drážkách	14 - kostra stroje
3 - čelo vinutí statoru	15 - ložiskový štít
4 - zuby magnetického obvodu statoru	16 - ložiskový štít
5 - mag. obvod statoru	17 - ložisko
6 - homogenizované zuby a tyče rotoru	18 - ložisko
7 - jeho mag. obvod rotoru	19 - hřídel (v oblasti ložiska)
8 - kruh rotorové klece	20 - hřídel (v kontaktu s vnitřním vzduchem)
9 - kruh rotorové klece	21 - hřídel (uvnitř klece nakrátko)
10 - vnitřní vzduch	22 - hřídel (v kontaktu s vnitřním vzduchem)
11 - vnitřní vzduch	23 - hřídel (v oblasti ložiska)
12 - kostra stroje	24 - hřídel (vnější část)

4 Sestavení rovnic tepelných odporů

Tato kapitola se zabývá definicí, výpočtem jednotlivých tepelných odporů a případným nahrazováním nebo zjednodušováním geometrie stroje. Rovnice tepelných odporů byly vytvořeny na základě rovnic popsaných v [19].

4.1 Stator

Stator, přesněji statorové vinutí je nejsložitější celek ve stroji, co se popisu týče. V realitě se obsah drážky statoru skládá z vodičů el. proudu, izolačního laku a drážkové izolace. Při popisu výpočtu odporu vinutí je uvažován objem celé drážky s ekvivalentní vodivostí, nahrazující vodiče, lak a vzduch současně se vyskytující v drážce. Tepelné vodivosti rotorových plechů se v radiálním a axiálním směru liší, jelikož v axiálním směru je mag. obvod tvořen kombinací plechu a izolačního laku.



Obr. 4.1: Stator

Čelo vinutí si lze představit jako toroid, do kterého v pravidelných vzdálenostech po obvodu vbíhají svazky vodičů z drážek. V řezu jej lze vidět na obr. 4.1 Je předpokládáno, že vinutí drážek mimo statorový paket má kruhový průřez, zatímco vinutí v drážkách má obdélníkový průřez. Poté lze stanovit dle [20] odpor z čela do vzduchu R_{1-10} jako součet $R_{\text{čelo-v}}$ a paralelní kombinace odporů samotného toroidu $R_{\text{čelo}}$ a vodičů mimo drážky R_{vin} . Jsou definovány jako

$$R_{\text{čelo}} = \frac{1}{16\pi^2 \lambda_{\text{čv}} r_{\text{čelo}}}, \quad (4.1)$$

$$R_{\text{vin}} = \frac{1}{8\pi \lambda_{\text{čv}} L_{\text{vi}} Q_s}, \quad (4.2)$$

$$R_{\text{čelo-v}} = \frac{1}{\alpha_{\text{čv-v}} \cdot (4\pi^2 r_{\text{čelo-r}} r_{\text{čelo}} + 2\pi r_{\text{svazek}} L_{\text{vi}} Q_s)}, \quad (4.3)$$

$$R_{1-10} = \left(\frac{R_{\text{čelo}} \cdot R_{\text{vin}}}{R_{\text{čelo}} + R_{\text{vin}}} \right) + R_{\text{čelo-v}}, \quad (4.4)$$

Díky symetrii statoru platí

$$R_{3-11} = R_{1-10}. \quad (4.5)$$

Vedení tepla ve statorových vodičích axiálním směrem je díky použitému měděnému materiálu velmi dobré a odpor z čela vinutí do drážek je definován jako

$$R_{1-2} = \frac{L_{k2}}{3\lambda_{\text{vi-ax}}v_{\text{vin}}tl_{\text{vin}}k_{\text{pCU}}Q_s} + \frac{L_{\text{čelo}}}{3\pi\lambda_{\text{čv}}r_{\text{svazek}}^2Q_s}, \quad (4.6)$$

$$R_{2-3} = R_{1-2}, \quad (4.7)$$

Přes odpory R_{4-10} , R_{4-11} , R_{5-10} a R_{5-11} je odváděno teplo ze statorového jha a zubů do vnitřního vzduchu. Jelikož axiální vodivost plechů je nízká, chlazení v axiálním směru nebude mít velký vliv na teplotu statorového paketu.

$$R_{4-10} = \frac{L_{k2}}{6\lambda_{\text{js-ax}}tl_zv_zk_{\text{pFe}}Q_s} + \frac{1}{\alpha_{\text{js-v}}tl_zv_zQ_s}, \quad (4.8)$$

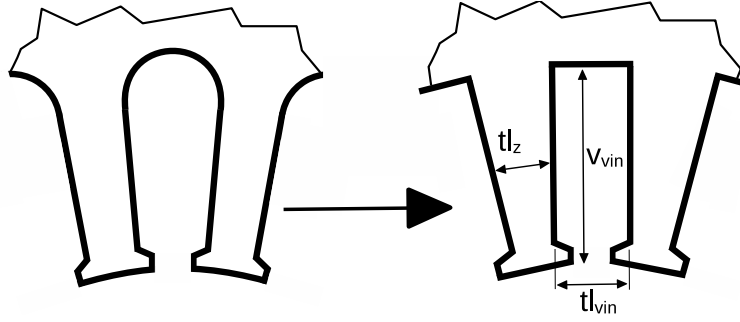
$$R_{4-11} = R_{4-10}, \quad (4.9)$$

$$R_{5-10} = \frac{L_{k2}}{6\pi\lambda_{\text{js-ax}}k_{\text{pFe}}(r_{1k}^2 - r_{\text{js}}^2)} + \frac{1}{\alpha_{\text{js-v}}\pi(r_{1k}^2 - r_{\text{js}}^2)}, \quad (4.10)$$

$$R_{5-11} = R_{5-10}, \quad (4.11)$$

4.1.1 Změna geometrie drážky statoru

Za účelem zjednodušení výpočtu byl změněn tvar drážky statorového vinutí. Jak lze vidět na obr. 4.2, drážka je ve výpočtu uvažována jako obdélníková s konstantní šířkou a výškou, pouze na konci bližším k rotoru je zúžená.



Obr. 4.2: Tvar drážky statoru

Následující rovnice pro R_{2-5} , R_{2-5} a R_{2-5} představují radiální odpory mezi jhem statoru, zuby a vnutím.

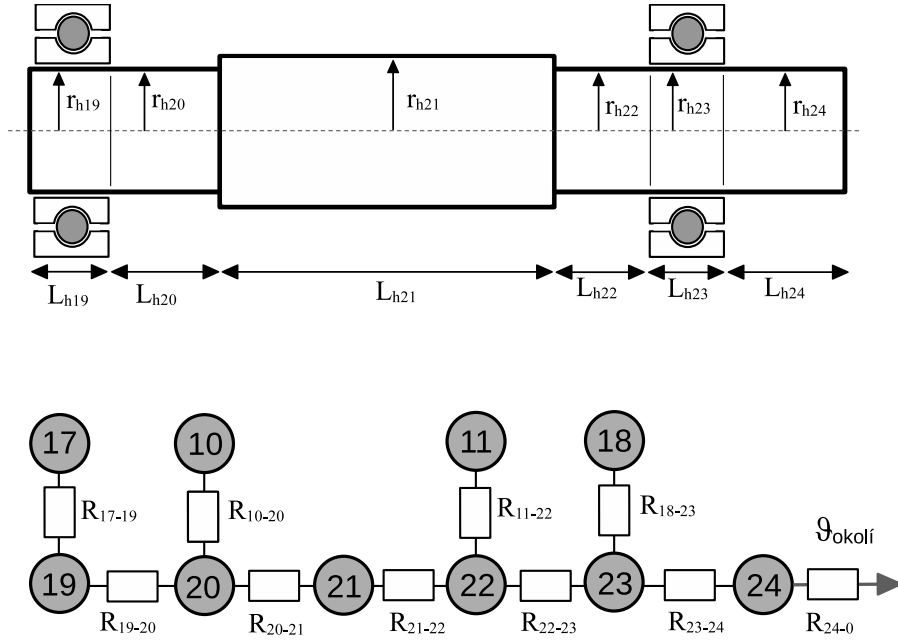
$$R_{2-5} = \frac{\ln \frac{r_{js-s}}{r_{js}}}{2\pi \lambda_{js-rad} L_{k2} k_{pFe}} + \frac{v_{vin}}{3\lambda_{vi-rad} L_{k2} t_{vin} 2Q_s} + \frac{t_l}{\lambda_i L_{k2} t_{vin} 2Q_s} \quad (4.12)$$

$$R_{4-5} = \frac{\ln \frac{r_{js-s}}{r_{js}}}{2\pi \lambda_{js-rad} L_{k2} k_{pFe}} + \frac{v_z}{6\lambda_{js-rad} L_{k2} t_l k_{pFe} Q_s}, \quad (4.13)$$

$$R_{2-4} = \frac{t_l}{6\lambda_{js-rad} L_{k2} v_z k_{pFe}} + \frac{t_{vin}}{6\lambda_{vi-rad} L_{k2} v_{vin} 2Q_s} + \frac{t_l}{\lambda_i L_{k2} v_{vin} 2Q_s}, \quad (4.14)$$

4.2 Hřídel

Hřídel je možné definovat jako spojení válců s odlišnými délkami a poloměry. Je vyrobena z jednoho kusu oceli, což zaručuje dobrou tepelnou vodivost. Na obr. 4.3 lze vidět schematické znázornění hřídele včetně hlavních rozměrů.



Obr. 4.3: Hřídel

Vypočítat tepelný odpor ložiska je obtížné, proto bylo zavedeno zjednodušení částí odporů R_{17-19} a R_{18-23} příslušící ložiskům na stykový odpor.

$$R_{17-19} = \frac{1}{8\pi\lambda_h L_{h19}} + \frac{1}{\alpha_{\text{lož-h}} 2\pi r_{h19} L_{\text{lož}}}, \quad (4.15)$$

$$R_{18-23} = \frac{1}{8\pi\lambda_h L_{h23}} + \frac{1}{\alpha_{\text{lož-h}} 2\pi r_{h23} L_{\text{lož}}}, \quad (4.16)$$

Dvě pomyslné části hřídele jsou chlazený do vnitřního vzduchu a tvoří odpory R_{10-20} a R_{11-22} .

$$R_{10-20} = \frac{1}{8\pi\lambda_h L_{h20}} + \frac{1}{\alpha_{\text{h-v}} 2\pi r_{h20} L_{h20}}, \quad (4.17)$$

$$R_{11-22} = \frac{1}{8\pi\lambda_h L_{h22}} + \frac{1}{\alpha_{\text{h-v}} 2\pi r_{h22} L_{h22}}, \quad (4.18)$$

Pomyslné rozdělení hřídele na pět částí definuje R_{19-20} , R_{20-21} , R_{21-22} , R_{22-23} a R_{23-24} jako axiální odpory mezi jednotlivými částmi hřídele. Není zde uvažován odpor styku, jelikož hřídel je z jednoho kusu materiálu.

$$R_{19-20} = \frac{L_{h19}}{3\pi\lambda_h r_{h19}^2} + \frac{L_{h20}}{6\pi\lambda_h r_{h20}^2}, \quad (4.19)$$

$$R_{20-21} = \frac{L_{h20}}{6\pi\lambda_h r_{h20}^2} + \frac{L_{h21}}{6\pi\lambda_h r_{h21}^2}, \quad (4.20)$$

$$R_{21-22} = \frac{L_{h21}}{6\pi\lambda_h r_{h21}^2} + \frac{L_{h22}}{6\pi\lambda_h r_{h22}^2}, \quad (4.21)$$

$$R_{22-23} = \frac{L_{h22}}{6\pi\lambda_h r_{h22}^2} + \frac{L_{h23}}{6\pi\lambda_h r_{h23}^2}, \quad (4.22)$$

$$R_{23-24} = \frac{L_{h23}}{6\pi\lambda_h r_{h23}^2} + \frac{L_{h24}}{3\pi\lambda_h r_{h24}^2}, \quad (4.23)$$

Odpor venkovní části hřídele do okolního vzduchu, kterým je chlazen je definován jako

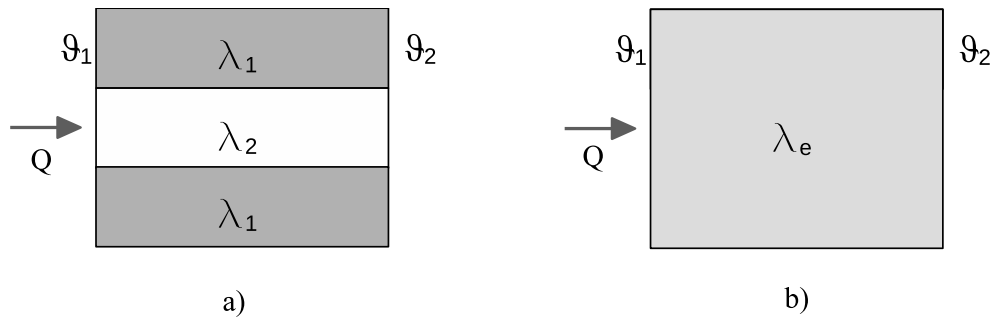
$$R_{24-0} = \frac{1}{8\pi\lambda_h L_{h24}} + \frac{1}{\alpha_{h-ven} 2\pi r_{h24} L_{h24}}, \quad (4.24)$$

4.3 Nahrazení ekvivalentní tepelnou vodivostí

Při výpočtu byl kladen důraz na zjednodušování pro nižší náročnost a složitost popisu částí stroje a tím i menší riziko chyb. Z toho důvodu lze zavést zjednodušení pomocí homogenizace nestejnorodých celků. Jak lze vidět na obr. 4.4, homogenizace spočívá v nahrazení více celků s odlišným objemem a odlišnou tepelnou vodivostí pouze jedním tělesem s ekvivalentní tepelnou vodivostí. Pro paralelní řazení materiálů lze dle [19] vypočítat součinitel ekvivalentní tepelné vodivosti.

$$\lambda_e = \frac{V_1\lambda_1 + V_2\lambda_2}{V_1 + V_2}, \quad (4.25)$$

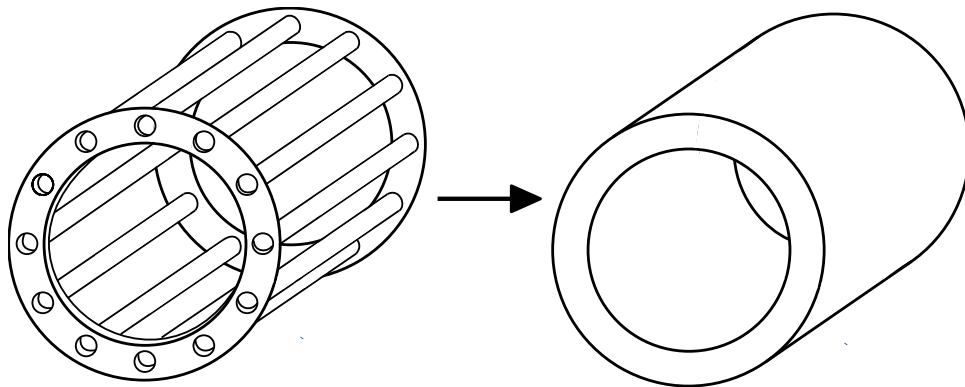
kde λ_1, V_1 značí tep. vodivost prvního materiálu, respektive objem prvního materiálu a λ_2, V_2 reprezentuje tep. vodivost druhého materiálu, respektive objem druhého materiálu.



Obr. 4.4: a) paralelní řazení více materiálů s odlišnými tep. vodivostmi, b) výsledný jeden materiál s jednou tep. vodivostí

4.3.1 Náhrada tyčí a zubů rotoru tělesem s ekvivalentní vodivostí

Rotorová klec společně se zuby rot. magnetického obvodu jsou komplikovaným celkem při definování tepelných odporů, přičemž nepřesnost způsobuje každá další úprava geometrie pro výpočet. Z toho důvodu bylo přistoupeno k nahrazení zmíněných částí tělesem ve tvaru dutého válce, viz obr. 4.5 o součtu objemů a ekvivalentní tepelné vodivosti.



Obr. 4.5: Homogenizace rotorové klece a zubů rotoru

Pro homogenizované těleso je třeba vypočítat tepelnou vodivost v axiálním a radiálním směru. Pro obojí platí paralelní řazení materiálů klece a zubů statoru. Pro axiální směr platí

$$\lambda_{\text{rot-ax}} = \frac{V_{\text{zuby}} \lambda_{\text{zuby-ax}} + V_{\text{tyče}} \lambda_{\text{tyče}}}{V_{\text{tyče}} + V_{\text{zuby}}}, \quad (4.26)$$

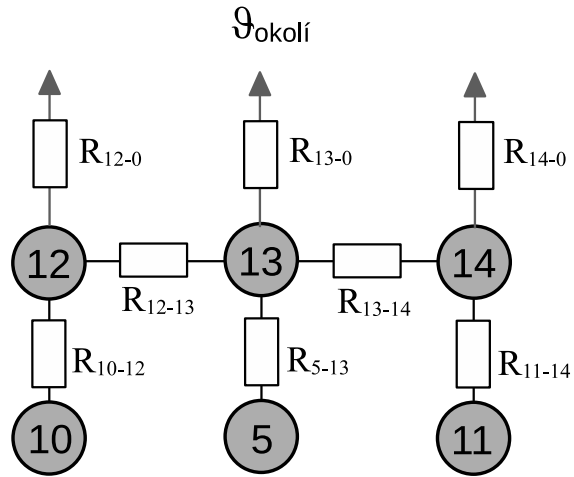
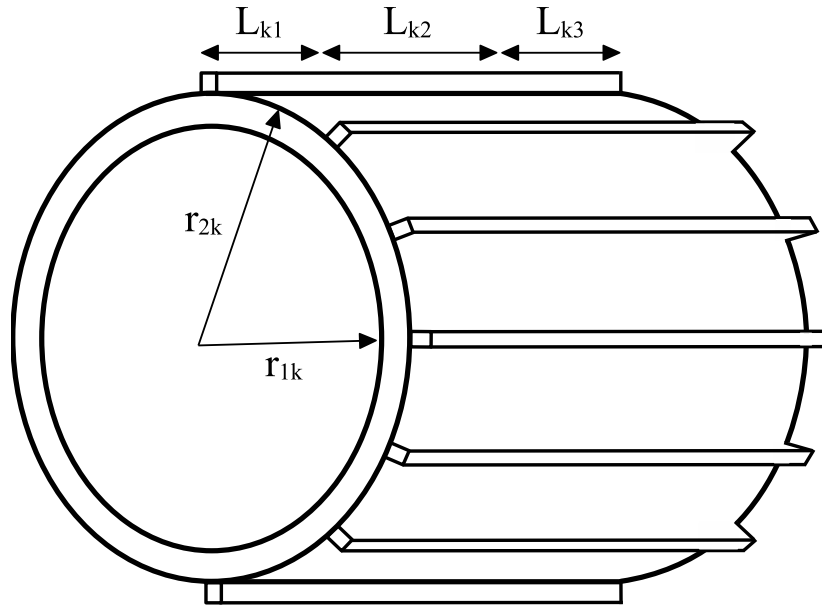
pro radiální směr platí

$$\lambda_{\text{rot-rad}} = \frac{V_{\text{zuby}}\lambda_{\text{zuby-rad}} + V_{\text{tyče}}\lambda_{\text{tyče}}}{V_{\text{tyče}} + V_{\text{zuby}}}, \quad (4.27)$$

kde V_{zuby} je objem rotorových zubů, $V_{\text{tyče}}$ je objem rotorových tyčí, $\lambda_{\text{tyče}}$ definuje koef. tepelné vodivosti rotorových tyčí, $\lambda_{\text{zuby-ax}}$ definuje koef. tepelné vodivosti rotorových zubů v axiálním směru a $\lambda_{\text{zuby-rad}}$ značí koef. tepelné vodivosti rotorových zubů v radiálním směru. Uvedené rovnice byly definovány na základě rovnice (4.25).

4.4 Kostra

Kostru lze zjednodušit do tvaru dutého válce jak lze vidět na obr. 4.6. Kostra je vyrobena z dobře vodivého materiálu na bázi hliníku. Vedle venkovní části hřídele a ložiskových štítů představuje největší část plochy, přes který je uskutečněn odvod tepla do okolního vzduchu. Při výpočtu nebylo uvažováno žebrování, které přispívá k lepšího odvodu tepla ze stroje a tím i ke snížení teplot.



Obr. 4.6: Kostra

Kostru lze rozdělit podélně do tří částí. Všechny jsou z vnějšku obklopeny venkovním vzduchem a náleží jim odpory R_{12-0} , R_{13-0} a R_{14-0} . Délka prostření části je totožná s délkou statorového paketu.

$$R_{12-0} = \frac{\ln \frac{r_{2k}}{r_{k-s}}}{2\pi\lambda_k L_{k1}} + \frac{1}{\alpha_{k-ven} 2\pi r_{2k} L_{k1}}, \quad (4.28)$$

$$R_{13-0} = \frac{\ln \frac{r_{2k}}{r_{k-s}}}{2\pi\lambda_k L_{k2}} + \frac{1}{\alpha_{k-ven} 2\pi r_{2k} L_{k2}}, \quad (4.29)$$

$$R_{14-0} = \frac{\ln \frac{r_{2k}}{r_{k-s}}}{2\pi \lambda_k L_{k3}} + \frac{1}{\alpha_{k-ven} 2\pi r_{2k} L_{k3}}, \quad (4.30)$$

Radiální odpory postranních částí do vnitřního vzduchu jsou definovány jako R_{10-12} a R_{11-14} .

$$R_{10-12} = \frac{\ln \frac{r_{k-s}}{r_{1k}}}{2\pi \lambda_k L_{k1}} + \frac{1}{\alpha_{k-v} 2\pi r_{1k} L_{k1}}, \quad (4.31)$$

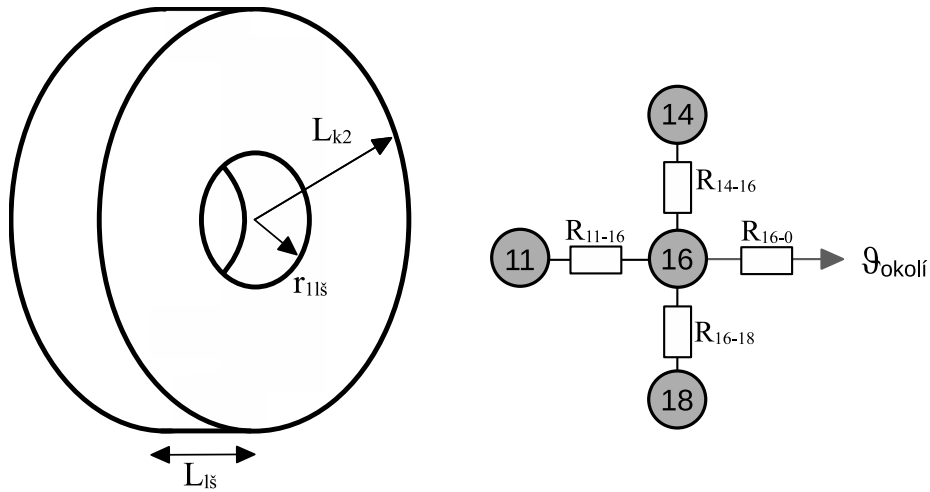
$$R_{11-14} = \frac{\ln \frac{r_{k-s}}{r_{1k}}}{2\pi \lambda_k L_{k3}} + \frac{1}{\alpha_{k-v} 2\pi r_{1k} L_{k3}}, \quad (4.32)$$

Tepelný odpor R_{5-13} se nachází mezi jhem statoru a kostrou stroje a je složen z radiálního odporu kostry, statorového jha a stykového odporu.

$$R_{5-13} = \frac{\ln \frac{r_{1k}}{r_{js-s}}}{2\pi \lambda_{js-rad} L_{k2} k_{pFe}} + \frac{\ln \frac{r_{k-s}}{r_{1k}}}{2\pi \lambda_k L_{k2}} + \frac{1}{\alpha_{k-js} 2\pi r_{1k} L_{k2}}, \quad (4.33)$$

4.5 Pravý ložiskový štít

Ložiskové štíty lze nahradit diskem s kruhovým otvorem uprostřed, ve kterém je nalisované ložisko. Na obr. 4.7 nebo 4.8 lze vidět náčrt ložiskového štítu.



Obr. 4.7: Ložiskový štít pravý

Ložiskový štít je chlazen z vnější strany přes odpor R_{16-0} a zároveň ohříván vnitřním vzduchem z vnitřní strany skrze odpor R_{11-16} .

$$R_{16-0} = \frac{L_{1s}}{6\pi\lambda_{1s} \cdot (r_{2k}^2 - r_{11s}^2)} + \frac{1}{\alpha_{1s-ven}\pi \cdot (r_{2k}^2 - r_{11s}^2)}, \quad (4.34)$$

$$R_{11-16} = \frac{L_{1s}}{6\pi\lambda_{1s} \cdot (r_{1k}^2 - r_{11s}^2)} + \frac{1}{\alpha_{1s-v}\pi \cdot (r_{1k}^2 - r_{11s}^2)}, \quad (4.35)$$

Obdobně jako u hřídele je ložisko reprezentováno pouze stykovým odporem ve vzorci odporu R_{16-18}

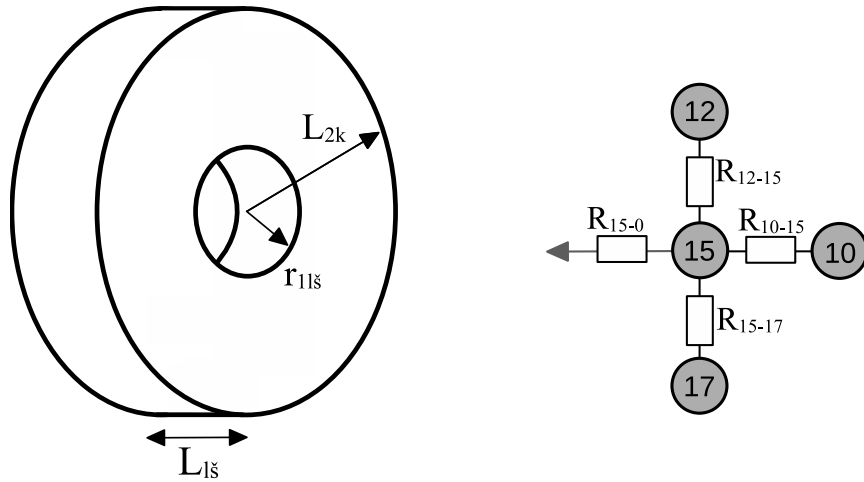
$$R_{16-18} = \frac{\ln \frac{r_{1s-s}}{r_{11s}}}{2\pi\lambda_{1s}L_{1s}} + \frac{1}{\alpha_{1s-lož}2\pi r_{11s}L_{lož}}, \quad (4.36)$$

Tepelný odpor R_{14-16} se nachází mezi ložiskovým štítem a kostrou stroje. Zmíněné součásti jsou obvykle spojeny šroubovým spojem, který umožňuje snížit vliv stykového odporu mezi součástmi na akceptovatelnou velikost.

$$R_{14-16} = \frac{L_{k1}}{6\pi\lambda_k \cdot (r_{2k}^2 - r_{1k}^2)} + \frac{\ln \frac{r_{2k}}{r_{1s-s}}}{2\pi\lambda_{1s}L_{1s}} + \frac{1}{\alpha_{k-1s}\pi \cdot (r_{2k}^2 - r_{1k}^2)}, \quad (4.37)$$

4.6 Levý ložiskový štít

Rozměry obou ložiskových štítů a rovnice z nich vycházející jsou totožné.



Obr. 4.8: Ložiskový štít levý

$$R_{15-0} = \frac{L_{1s}}{6\pi\lambda_{1s} \cdot (r_{2k}^2 - r_{11s}^2)} + \frac{1}{\alpha_{1s-ven}\pi \cdot (r_{2k}^2 - r_{11s}^2)}, \quad (4.38)$$

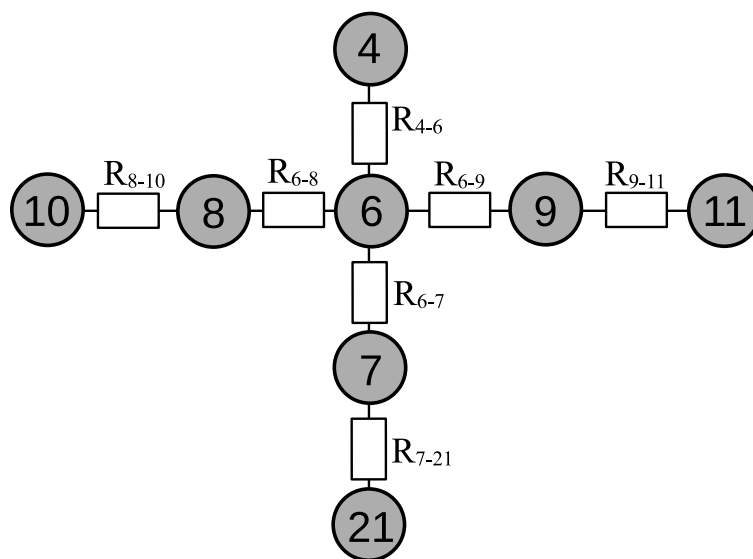
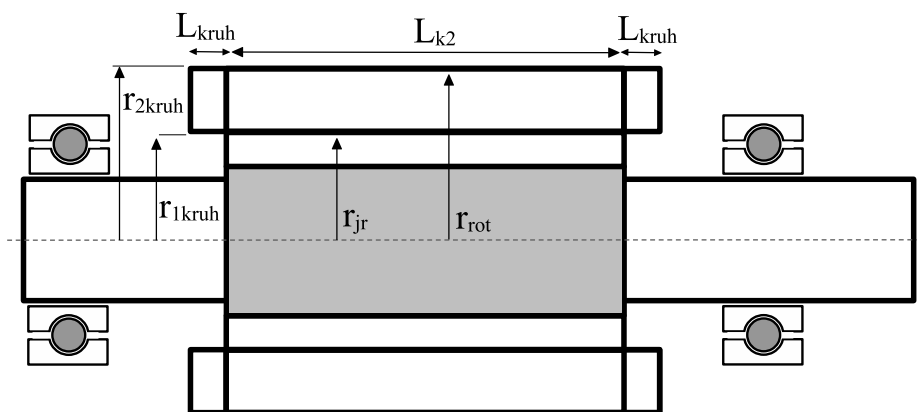
$$R_{10-15} = \frac{L_{1s}}{6\pi\lambda_{1s} \cdot (r_{1k}^2 - r_{11s}^2)} + \frac{1}{\alpha_{1s-v}\pi \cdot (r_{1k}^2 - r_{11s}^2)}, \quad (4.39)$$

$$R_{15-17} = \frac{\ln \frac{r_{1s-s}}{r_{11s}}}{2\pi\lambda_{1s}L_{1s}} + \frac{1}{\alpha_{1s-lož}2\pi r_{11s}L_{lož}}, \quad (4.40)$$

$$R_{12-15} = \frac{L_{k1}}{6\pi\lambda_k \cdot (r_{2k}^2 - r_{1k}^2)} + \frac{\ln \frac{r_{2k}}{r_{1s-s}}}{2\pi\lambda_{1s}L_{1s}} + \frac{1}{\alpha_{k-lš}\pi \cdot (r_{2k}^2 - r_{1k}^2)}, \quad (4.41)$$

4.7 Rotor

Díky homogenizaci zubů a tyčí, lze rotor popsat za použití více různých dutých válců. Tepelné vodivosti rotorových plechů se v radiálním a axiálním směru liší, jelikož v axiálním směru je magnetický obvod tvořen kombinací plechu a izolačního laku. Náčrt rotoru včetně popisů důležitých rozměrů lze vidět na ob. 4.9.



Obr. 4.9: Rotor

Kruhy rotoru jsou chlazený vnitřním vzduchem přes odpor R_{8-10} , který je složen z paralelní kombinace axiálního a radiálního odporu z kruhu do vzduchu. Pro oba směry je uvažován stejný součinitel přestupu tepla.

$$R_{8-10,ax} = \frac{L_{kruh}}{6\pi\lambda_{kruh} \cdot (r_{2kruh}^2 - r_{1kruh}^2)} + \frac{1}{\alpha_{kruh-v}\pi \cdot (r_{2kruh}^2 - r_{1kruh-v}^2)}, \quad (4.42)$$

$$R_{8-10,rad} = \frac{\ln \frac{r_{2kruh}}{r_{1kruh}}}{2\pi\lambda_{kruh}L_{kruh}} + \frac{1}{\alpha_{kruh-v}2\pi r_{2kruh}L_{kruh}}, \quad (4.43)$$

$$R_{8-10} = \frac{R_{8-10,ax} \cdot R_{8-10,rad}}{R_{8-10,ax} + R_{8-10,rad}}, \quad (4.44)$$

Protože rotor je symetrický, lze definovat odpor R_{9-11} následovně

$$R_{9-11} = R_{8-10}, \quad (4.45)$$

Jelikož homogenizovaná část rotoru se skládá i z rotorových plechů, je třeba zahrnout do R_{6-8} stykový odpor. Hodnota koeficientu $\lambda_{\text{rot-ax}}$ byla kvalifikovaně odhadnuta.

$$R_{6-8} = \frac{L_{\text{jr}}}{6\pi\lambda_{\text{rot-ax}} \cdot (r_{\text{rot}}^2 - r_{\text{jr}}^2)} + \frac{L_{\text{kruh}}}{6\pi\lambda_{\text{kruh}} \cdot (r_{\text{rot}}^2 - r_{\text{jr}}^2)} + \frac{1}{\alpha_{\text{kruh-rot}}\pi \cdot (r_{2\text{kruh}}^2 - r_{1\text{kruh-t}}^2)}, \quad (4.46)$$

díky symetrii rotoru platí

$$R_{6-9} = R_{6-8}, \quad (4.47)$$

Teplo, které nebylo odvedeno z rotoru do vzduchu teče přes odpor R_{7-21} ze jha rotoru do hřídele, na které je nalisováno.

$$R_{7-21} = \frac{1}{8\pi\lambda_{\text{h}}L_{\text{h21}}} + \frac{\ln \frac{r_{\text{jr-s}}}{r_{\text{h21}}}}{2\pi\lambda_{\text{jr-rad}}L_{\text{jr}}k_{\text{pFe}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{jr-h}}2\pi r_{\text{h21}}L_{\text{h21}}}, \quad (4.48)$$

$$R_{6-7} = \frac{\ln \frac{r_{\text{jr}}}{r_{\text{jr-s}}}}{2\pi\lambda_{\text{jr-rad}}L_{\text{jr}}k_{\text{pFe}}} + \frac{\ln \frac{r_{\text{rot-s}}}{r_{\text{jr}}}}{2\pi\lambda_{\text{rot-rad}}L_{\text{jr}}}, \quad (4.49)$$

Vzduchová mezera mezi statorem a rotorem je součástí odporu R_{4-6} a je popsána za pomoci dvou součinitelů přestupu tepla.

$$R_{4-6} = \frac{\ln \frac{r_{\text{rot}}}{r_{\text{rot-s}}}}{2\pi\lambda_{\text{rot-rad}}L_{\text{k2}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{rot-v-rad}}2\pi r_{\text{rot}}L_{\text{k2}}} + \frac{tl_z}{6\lambda_{\text{js-rad}}v_zL_{\text{k2}}k_{\text{pFe}}Q_s} + \frac{1}{\alpha_{\text{stat-v-rad}}tl_zL_{\text{k2}}Q_s}, \quad (4.50)$$

5 Výpočet

Tato kapitola shrnuje a rozebírá výsledky výpočtu. Dále informuje o materiálových vlastnostech, součinitelích přestupu tepla a ztrátách jako parametrech pro výpočet.

5.1 Výsledné střední teploty

Výpočet teplot byl realizován prostřednictvím programovacího jazyka Python v prostředí Pycharm.

Tab. 5.1: Střední teploty částí stroje

Číslo uzlu	Název části	Střední teplota °[C]
1	čelo vinutí	99,10
2	vinutí v drážkách	94,07
3	čelo vinutí	99,05
4	zuby mag. obvdou statoru	88,88
5	jho mag. obvdou statoru	87,97
6	hom. klec se zuby	100,90
7	jho mag. obvdou rotoru	100,86
8	kruh rotorové klece	102,52
9	kruh rotorové klece	102,50
10	vnitřní vzduch	92,96
11	vnitřní vzduch	92,80
12	kostra	77,05
13	kostra	78,87
14	kostra	76,89
15	ložiskový štít	76,73
16	ložiskový štít	76,23
17	ložisko	78,97
18	ložisko	78,15
19	hřídel v oblasti ložiska	79,24
20	hřídel ve vnitřním vzduchu	79,83
21	hřídel ve styku s jhem rotoru	81,28
22	hřídel ve vnitřním vzduchu	78,86
23	hřídel v oblasti ložiska	78,10
24	hřídel vně stroje	77,64

Dle výsledků výpočtu lze říct, že nejteplejšími částmi budou kruhy rotoru společně s magnetickým obvodem rotoru. Jelikož pro funkci asynchronního motoru je třeba aby rotorem tekla proud, lze očekávat, že při dodávání jmenovitého výkonu budou ztráty v rotoru a tím i teplota vyšší než v případě reluktančního motoru, nebo synchronního s permanentními magnety.

Druhým nejteplejším místem je vinutí statoru. Část v drážkách ohřívá magnetický obvod statoru, díky čemuž se chladí lépe než čela vinutí, která odvádí teplo hlavně do vnitřního vzduchu.

Teplotní rozdíl mezi nejchladnější částí a nejteplejší je přibližně dvacet pět stupňů Celsia, což lze přisoudit kompaktnosti stroje jehož rozměry se pohybují v řádu centimetrů.

Odvod tepla skrze hřídel nemá velký vliv na teplotu uzlů, jelikož rozdíly teplot na levé a pravé straně stroje se liší maximálně o stupeň Celsia.

5.2 Tepelné toky

Tab. 5.2: Tepelné toky do okolí

uzel	velikost toku [W]
12 → $\vartheta_{\text{okolí}}$	25,89
13 → $\vartheta_{\text{okolí}}$	188,78
14 → $\vartheta_{\text{okolí}}$	25,81
15 → $\vartheta_{\text{okolí}}$	25,73
16 → $\vartheta_{\text{okolí}}$	25,48
24 → $\vartheta_{\text{okolí}}$	3,29

Tepelné toky do okolí ukazují, kolik tepla je odvedeno z uzlu do okolí, tedy jak dobře se daná část chladí. Tepelná síť uvažuje šest toků.

Největší množství tepla je odvedeno z uzlu třináct, který představuje střední část kostry a stýká se magnetickým obvodem statoru. Části kostry, které přebírají teplo z vnitřního vzduchu odvedou téměř stejné množství tepla jako ložiskové štíty.

Nejméně tepla je odvedeno prostřednictvím vnější části hřídele. Model počítá s odevzdáváním tepla do vzduchu, ovšem v realitě bude hřídel sloužit k předání výkonu a bude pravděpodobně v kontaktu s kovovou částí. Tepelný tok bude vyšší a teploty součástí nižší.

Tab. 5.3: Tepelné toky ve stroji

mezi uzly	velikost toku [W]
5 → 13	234,1
1 → 2	14,8
3 → 2	14,7
1 → 10	8,2
3 → 11	8,3
6 → 4	42
8 → 10	6
9 → 11	6
10 → 15	6,9
11 → 16	7,1

Tepelné toky ve stroji mohou vylepšit povědomí o tom, kudy se šíří tepelná energie z místa kde vznikla přeměnou.

5.3 Vstupní parametry

Tab. 5.4: Ztráty ve stroji

část stroje	velikost ztrát [W]
čela vinutí	2 · 25
vinutí v drážkách	100
zuby statoru	37,5
jho statoru	20
hom. klec a zuby rotoru	27,5
kruhy rotoru	2 · 15
ložiska	2 · 25

Uvažované ztráty třením o vzduch o hodnotě 15W byly rozděleny stejným dílem mezi zuby statoru a homogenizovaný celek tyčí a zubů rotoru.

Tab. 5.5: Činitele plnění

Označení	Název	velikost [-]
k_{pFe}	činitel plnění železa	0,97
k_{pCU}	činitel plnění vinutí	0,46

Činitele plnění vyjadřují poměr plochy čistého průřezu materiálu (skutečného) ku celkovému průřezu, tedy udávají jak přesně je dodržen skutečný objem materiálu.

Tab. 5.6: Hodnoty důležitých rozměrů

Parametr	Popis	velikost [m]
r_{2k}	vnější poloměr kostry	0,0714
tl_k	tloušťka kostry	0,0034
L_{Fe}	délka mag. obvodu statoru a rotoru	0,155
Q_s	počet drážek statoru	36 [-]
n_v	počet vodičů v drážce statoru	21 [-]
r_{Fe}	poloměr hřídele v oblasti mag. obvodu	0,014
r_{rot}	vnější poloměr rotoru	0,0467
d_v	velikost vzduchové mezery	0,0003
v_{vin}	výška vinutí statoru v drážce	0,01
tl_{vin}	tloušťka vinutí statoru v drážce	0,0045

V tabulce jsou uvedeny číselné hodnoty důležitých rozměrů stroje.

Tab. 5.7: Součinitele tepelné vodivosti použité při výpočtu

Označení	materiál	velikost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
λ_k	kostra	200
λ_h	hřídel	45
λ_i	drážková izolace	0.2
$\lambda_{lš}$	ložiskový štít	200
λ_{kruh}	kruh rotoru	209
$\lambda_{čv}$	čelo vinutí včetně laku, průměrováno	12
λ_{rot-ax}	hom. klec se zuby rotoru, axiálně	63
$\lambda_{rot-rad}$	hom. klec se zuby rotoru, radiálně	87
λ_{jr-rad}	plechy rotoru, radiálně	35
λ_{js-ax}	plechy statoru, axiálně	0.6
λ_{js-rad}	plechy statoru, radiálně	35
λ_{vi-ax}	vinutí, axiálně	394
λ_{vi-rad}	vinutí včetně laku, radiálně	0.5

Tab. 5.8: Součinitele přestupu tepla do vzduchu a ve styku použité při výpočtu

Označení	Název	velikost [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
α_{k-ven}	kostra, vnější vzduch	50
α_{h-ven}	hřídel, vnější vzduch	20
$\alpha_{lš-ven}$	ložiskový štít, vnější vzduch	40
α_{k-v}	kostra, vnitřní vzduch	40
α_{h-v}	hřídel, vnitřní vzduch	20
$\alpha_{lš-v}$	ložiskový štít, vnitřní vzduch	40
α_{kruh-v}	kruh rotoru, vnitřní vzduch	80
$\alpha_{čv-v}$	čelo vinutí, vnitřní vzduch	40
α_{js-v}	jho statoru axiálně, vnitřní vzduch	40
$\alpha_{rot-v-rad}$	povrch rotoru radiálně, vnitřní vzduch	190
$\alpha_{stat-v-rad}$	zuby statoru radiálně, vnitřní vzduch	190
α_{jr-h}	styk jha rotoru a hřídele	840
$\alpha_{kruh-rot}$	styk kruhu rotoru a hom. zubů s klecí	3600
$\alpha_{lš-lož}$	styk ložiska a ložiskového štítu	3560
$\alpha_{k-lš}$	styk kostry a ložiskového štítu	5200
α_{k-js}	styk kostry a jha statoru	420
$\alpha_{lož-h}$	styk ložiska a hřídele	2300

Závěr

Cílem této práce bylo provést rešerši týkající se asynchronních strojů, přenosu tepla a navrhnout tepelnou síť.

První část se zabývá principem stroje a jeho možným konstrukčním provedením. Charakterizuje tři režimy práce asynchronního stroje a popisuje detailně jednotlivé komponenty ze kterých je stroj složen. Dále prezentuje odvození ekvivalentního schématu a jeho využití při výpočtu ztrát ve stroji.

Druhá část se věnuje způsobům přenosu tepla. Diskutuje tři způsoby přenosu tepla, předkládá elementární rovnice pro výpočet přenesené energie a prezentuje důležité fyzikální veličiny spojované s problematikou.

Třetí část popisuje princip metody tepelné sítě, poukazuje na tvorbu maticových rovnic pro výpočet a poukazuje na analogii tepelných veličin s elektrickými. Součástí kapitoly je navržená tepelná síť pro asynchronní stroj.

Ve čtvrté části se práce zabývá sestavením rovnic tepelných odporů analyzovaného stroje. Za pomoci náčrtů a textu popisuje úpravy geometrie.

V poslední části je věnován prostor vstupním parametrům výpočtu, které hrají velmi důležitou roli při návrhu, dále obsahuje výsledné teploty všech částí a tepelné toky pro lepší představu tepelných dějů uvnitř. Teplota vinutí statoru přesahuje sto stupňů Celsia, což by mohlo vést k destrukci izolačního laku a zkratu. Výpočet ovšem zanedbává žebrování kostry a počítá s odvodem tepla skrz hřídel pouze do vzduchu, takže reálné teploty by mohly být ještě o několik stupňů nižší. Pro provoz by bylo vhodné snížit jmenovité ztráty nebo zvážit možnost odvodu tepla alespoň přes hřídel.

Literatura

- [1] Hrabovcová, V. Elektrické stroje - Teória a príklady. (EDIS,2015)
- [2] Pyrhönen, J. Electrical machine drives control : an introduction. (John Wiley and Sons, Inc.,2016)
- [3] FITZGERALD, A.E., Charles, Jr. KINGSLEY a Stephen D. UMANS, 2002. *Electric machinery*. 704 s. 6 edition. ISBN 0-07-112193-5.
- [4] SEN, P. C., [2014]. *Principles of electric machines and power electronics*. Third edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley. ISBN 978-111-8078-877.
- [5] MĚŘIČKA, Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK, 2000. *Elektrické stroje*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-010-2109-2.
- [6] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. *Design of Rotating Electrical Machines*. 2nd Edition. New Delhi, India: Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 2013. ISBN ISBN: 978-1-118-58157-5.
- [7] ONDRŮŠEK, Č. *Elektrické stroje* [online]. Skriptum. Vysoké Učení Technické v Brně, FEKT, 114 s. [cit. 2023-11-20].
- [8] BOLDEA, I., 2020. *Induction machines handbook: steady state modeling and performance* [online]. Third edition. Boca Raton: CRC Press [cit. 2024-01-15]. ISBN 978-1-003-
- [9] KOPYLOV, Igor P a Petr VOŽENÍLEK, 1988. *Stavba elektrických strojů*. Praha: Moskva: SNTL - Nakladatelství technické literatury ; Mir, 685 stran : ilustrace.
- [10] Tsai, W. Effect of Inverter Parameters on Iron Losses in a PWM Inverter-Fed Induction Motor. *2009 Fourth International Conference On Innovative Computing, Information And Control (ICICIC)*. pp. 914-917 (2009)
- [11] ČSN EN 60034-2-1 *Točivé elektrické stroje - Část 2-1: Standardní metody určování ztrát a účinnosti ze zkoušek*, 2008. Praha: Český normalizační institut. [online]. [cit. 2023-11-26].
- [12] ÇENGEL, Yunus A, Afshin J. (Afshin Jahanshahi) GHAJAR a Mehmet KANOĞLU, 2015. *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*. Fifth edition in SI units / adapted by Mehmet Kanoğlu. New York: McGraw-Hill Education, xxiii, 944 stran : ilustrace, ; 26 cm. ISBN 9789814595278.

- [13] ILONA, Lázničková, 2014. *Technická mechanika: Termomechanika, Mechanika poddajných těles* [online]. [cit. 2023-11-26].
- [14] HALLIDAY, David, Robert RESNICK, Jearl WALKER a Petr DUB, 2013. *Fyzika. Svazek 1. 2. přeprac. vyd.* Brno: VUTIUM. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [15] *Quantaphysics.com* [online]. [cit. 2023-12-04]. Dostupné z: <https://www.quantaphysics.com/2020/05/black-body-radiation.html>
- [16] POPOVA, Lyudmila, 2010. *COMBINED ELECTROMAGNETIC AND THERMAL DESIGN PLATFORM FOR TOTALLY ENCLOSED INDUCTION MACHINE* [online]. Lappeenranta, 76 s. Diplomová práce. LAPPEENRANTA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, FACULTY OF TECHNOLOGY DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING. Vedoucí práce Prof. Juha Pyrhönen. [cit. 2024-10-01].
- [17] TOMAN, Marek, 2015. *Vázané modelování asynchronního motoru metodou fyzikálního modelování* [online]. Vysoké Učení Technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 63 s. Diplomová práce. Vedoucí práce Doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D. [cit. 2024-10-01].
- [18] PATOČKA, Miroslav, 2005. *Vybrané statě z výkonové elektroniky. [online]. Svazek I, Tepelné jevy, činný výkon.* 3. vydání. Brno, FEKT, 61 s. ISBN 80-214-2742-6. [cit. 2024-20-03].
- [19] SÚKENÍK, Jakub, 2023. *Tepelný model synchronního motoru s permanentními magnety s přímým připojením na síť.* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 88 s. Diplomová práce. Vedoucí práce Ing. Marek Toman. [cit. 2024-20-05].
- [20] SVĚTLÍK, Martin, 2020. *Tepelný model vysokootáčkového asynchronního motoru.* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 58 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Marek Toman. [cit. 2024-20-05].

Seznam symbolů a zkratek

Parametr	Popis
α	Součinitel přestupu tepla
δ	Mezní vrstva
ΔP	Ztráty ve stojí
ΔP_d	Dodatečné ztráty
ΔP_{dN}	Nominální dodatečné ztráty
ΔP_{Fe}	Ztráty v železe
ΔP_h	Hysterezní ztráty
ΔP_{j1}	Jouleovy ztráty ve statoru
ΔP_{j2}	Jouleovy ztráty v rotoru
ΔP_{mech}	Mechanické ztráty
ΔP_v	ztráty vířivými proudy
ΔT	Oteplení
ϵ	Emisivita
η	Účinnost
ϑ	Teplota
ϑ	Matice teplot
λ	Součinitel tepelné vodivosti
λ_1	Součinitel tepelné vodivosti prvního materiálu
λ_2	Součinitel tepelné vodivosti druhého materiálu
λ_e	Součinitel ekvivalentní tepelné vodivosti
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta
ϕ	Tepelný tok
φ_f	Fázový posun
φ	El. potenciál
B_{max}	Max. hodnota magnetické indukce
c	Rychlost proudění
c_{ϑ}	Měrná tepelná kapacita
C	Elektrická kapacita
C_{ϑ}	Tepelná kapacita
$\cos\varphi_f$	Účinník
d	Tloušťka
d_v	Tloušťka vzduchové mezery
D_v	Průměr ventilátoru
f	Frekvence

Parametr	Popis
g	Tep. vodivost ve vedlejší diagonále
G	Součet tep. vodivostí v hlavní diagonále
\mathbf{G}	Matice tepelných vodivostí
I	Elektrický proud
I_n	Jmenovitý el. proud
I_r	El. proud rotoru
I_s	El. proud statoru
$I_{záb}$	Záběrný el. proud
K_h	Hysterezní koeficient
K_t	Konstanta stroje
K_v	Koeficient vířivých proudů
L	Průměr trubice
m	Počet fází
$M_{záb}$	Záběrný moment
n	Otáčky
n_r	Otáčky rotoru
n_s	Otáčky mag. pole statoru
n_v	Počet vodičů v drážce statoru
N_u	Nusseltovo číslo
P	Tepelný tok
\mathbf{P}	Matice tepelných toků
P_{in}	Dodaný výkon
P_{out}	Odevzdaný výkon
P_z	Vyzářený výkon
Q	Teplo
Q_e	Elektrický náboj
R	Elektrický odpor
R_e	Reynoldsovo číslo
R_{ϑ}	Tepelný odpor
R_{Fe}	El. odpor charakterizující ztráty v železe
R_r	El. odpor klece nakrátko
R_r'	Přepočtená hodnota el. odporu rotoru
R_s	El. odpor statorového vinutí]
s	Skruz

Parametr	Popis
S	Povrch tělesa
S_t	Teplosměnná plocha
t	Čas
tl_k	Tloušťka kostry
T	Termodynamická teplot vyzařujícího tělesa
T_o	Termodyn. teplota tělesa přijímajícího energii
T_n	Teplota tekutiny daleko od tělesa
T_t	Teplota povrchu tělesa
T_H	Teplota horké lázně
T_S	Teplota studené lázně
U	Elektrické napětí
v	Kinematická viskozita
V_1	Objem prvního materiálu
V_2	Objem druhého materiálu
W	Tepelná energie
X_m	Magnetizační reaktance
X_r'	Přepočtená hodnota reaktance rotoru
X_s	Reaktance statoru

A Tabulka značení rozměrů

Rozměr	Popis
$L_{\check{c}elo}$	Axiální délka čela vinutí
L_{h19}	Axiální délka hřídele v oblasti ložiska
L_{h20}	Axiální délka hřídele ve vnitřním vzduchu
L_{h21}	Axiální délka hřídele v oblasti mag. obvodu rotoru
L_{h22}	Axiální délka hřídele ve vnitřním vzduchu
L_{h23}	Axiální délka hřídele v oblasti ložiska
L_{k24}	Axiální délka hřídele mimo stroj
L_{jr}	Axiální délka jha rotoru
L_{k1}	Axiální délka první části kostry
L_{k2}	Axiální délka střední části kostry
L_{k3}	Axiální délka třetí části kostry
L_{kruh}	Axiální délka kruhu rotoru
$L_{lož}$	Axiální délka ložiska
$L_{š}$	Axiální délka ložiskového štítu
L_{vi}	Axiální délka čela vinutí
$r_{\check{c}elo}$	Poloměr toroidu čela vinutí
$r_{\check{c}elo-r}$	Poloměr průřezu toroidu čela vinutí
r_{h19}	Poloměr hřídele v oblasti ložiska
r_{h20}	Poloměr hřídele ve vnitřním vzduchu
r_{h21}	Poloměr hřídele v oblasti mag. obvodu rotoru
r_{h22}	Poloměr hřídele ve vnitřním vzduchu
r_{h23}	Poloměr hřídele v oblasti ložiska
r_{h24}	Poloměr hřídele mimo stroj
r_{jr}	Poloměr jha rotoru
r_{jr-s}	Střední poloměr jha rotoru
r_{js}	Poloměr jha statoru
r_{js-s}	Střední poloměr jha statoru
r_{rot}	Vnější poloměr rotoru
r_{rot-s}	Střední poloměr homogenizované části rotoru
r_{svazek}	Poloměr svazku vodičů z drážky do čela vinutí
r_{1k}	Vnitřní poloměr kostry
r_{2k}	Vnější poloměr kostry
r_{k-s}	Střední poloměr kostry

Rozměr	Popis
$r_{1lš}$	Vnitřní poloměr ložiskového štítu
$r_{lš-s}$	Střední poloměr ložiskového štítu
r_{1kruh}	Vnitřní poloměr kruhu rotoru
$r_{1kruh-t}$	Vnitřní poloměr kruhu rotoru na straně tyčí
$r_{1kruh-v}$	Vnitřní poloměr kruhu rot. na straně vnitřního vzduchu
r_{2kruh}	Vnější poloměr kruhu rotoru
tl_i	Tloušťka drážkové izolace
tl_{vin}	Tloušťka statorového vinutí
tl_z	Tloušťka zubu
v_{vin}	Výška statorového vinutí
v_z	Výška zubu