

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Šíření tepla v asynchronním stroji**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan CHVOJKA**  
Osobní číslo: **E13B0359P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Šíření tepla v asynchronním stroji**  
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

### Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rozbor jednotlivých podsystémů asynchronního stroje.
2. Popište izolační systém asynchronního stroje a zaměřte svoji práci na nové elektroizolační materiály.
3. Popište způsoby šíření tepla v elektrických strojích.
4. Proveďte návrh výpočtu oteplení statorového svazku a vinutí.
5. Konfrontujte analytický tepelný návrh elektrického točivého stroje sestaveného na základě náhradní tepelné sítě s výsledky analýzy metodou konečných prvků a měřením.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

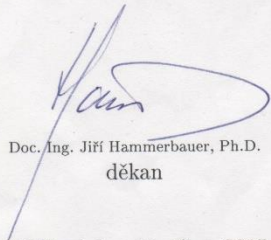
Seznam odborné literatury:

1. CIGÁNEK L., Stavba elektrických strojů. Praha: SNTL, 1958.
2. LIST V., HAK J. a kol., a. Elektrotechnika II - elektrické stroje, část 1. Praha: SNTL, 1969.
3. ŠAVEL J., Materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice, BEN 2005.
4. MENTLÍK V., Dielektrické prvky a systémy, Praha, BEN 2006.
5. Internetové zdroje.

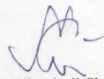
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tetjana Tomášková**  
Regionální technologický institut

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**

  
Doc. Ing. Jifí Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce je zaměřena na popis jednotlivých podsystémů asynchronního stroje. V části, kde je popisován izolační systém asynchronního stroje, je práce zaměřena na nové elektroizolační materiály. Dále práce popisuje jednotlivé způsoby šíření tepla v elektrických strojích. Poté je navrhnut výpočet na oteplení statorového svazku a vinutí. V závěru je konfrontován analytický tepelný návrh elektrického točivého stroje na základě náhradní tepelné sítě s výsledky analýzy metodou konečných prvků a měřením.

## **Klíčová slova**

Asynchronní stroj, podsystémy asynchronního stroje, izolační systémy, vakuově tlaková impregnace (VPI), resin-rich (RR), nanoplňiva, záření, vedení, konvence.

## **Abstract**

This bachelor thesis is focused on the description of the subsystems of asynchronous machines. The work is focused on new electrical insulating materials in part where insulation systems of asynchronous machine are described. It also describes the different methods of heat spreading in electrical machines. After that the calculate of temperature rise in the stator winding and pack is designed. In conclusion the analytical thermal design of electrical rotating machines based on alternative heating network is confronted with the results of finite element analysis and measurement.

## **Key words**

Asynchronous machine, subsystems of asynchronous machines, insulation systems, vakuum pressure impregnation (VPI), resin-rich (RR), nanofiller, radiation, conduction, convention.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 1.6.2016

Jan CHVOJKA

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucí bakalářské práce paní Ing. Tetjane Tomáškové za velmi cenné profesionální rady, připomínky, metodické vedení práce a čas, který mi věnovala.

# Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>8</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>11</b>
<b>1 ELEKTRICKÉ TOČIVÉ STROJE .....</b>	<b>13</b>
1.1 ASYNCHRONNÍ STROJE .....	13
1.2 SYNCHRONNÍ STROJE .....	15
1.3 STEJNOSMĚRNÉ STROJE.....	16
<b>2 PODSYSTÉMY ASYNCHRONNÍHO STROJE.....</b>	<b>18</b>
2.1 MAGNETICKÝ PODSYSTÉM .....	18
2.2 MECHANICKÝ PODSYSTÉM.....	20
2.3 ELEKTRICKÝ PODSYSTÉM.....	20
2.3.1 <i>Vinutí statoru asynchronního stroje</i> .....	20
2.3.2 <i>Vinutí rotoru asynchronního stroje</i> .....	22
2.4 CHLADÍCÍ PODSYSTÉM .....	22
2.4.1 <i>Přirozené chlazení</i> .....	23
2.4.2 <i>Vlastní chlazení</i> .....	23
2.4.3 <i>Cizí chlazení</i> .....	23
2.4.4 <i>Průtahová ventilace</i> .....	23
2.4.5 <i>Kapalinové chlazení</i> .....	23
2.4.6 <i>Chlazení plynem</i> .....	24
2.5 ZÁKLADNÍ VENTILAČNÍ VÝPOČTY .....	24
<b>3 IZOLAČNÍ PODSYSTÉM ASYNCHRONNÍHO STROJE.....</b>	<b>25</b>
3.1 IZOLANTY.....	27
3.2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY .....	28
3.2.1 <i>Nosná složka</i> .....	28
3.2.2 <i>Plniva</i> .....	29
3.2.3 <i>Pojiva</i> .....	29
3.3 IZOLACE NÍZKONAPĚŤOVÝCH ASYNCHRONNÍCH STROJŮ .....	29
3.3.1 <i>Izolace drážek</i> .....	29
3.3.2 <i>Izolace vodičů</i> .....	30
3.3.3 <i>Impregnace</i> .....	30
3.4 IZOLACE VYSOKONAPĚŤOVÝCH ASYNCHRONNÍCH STROJŮ .....	31
3.4.1 <i>Vacuum preassure impregnation (VPI)</i> .....	31
3.4.2 <i>Resin Rich</i> .....	32
3.5 MOŽNOST VYUŽITÍ NANOPLNIV .....	33
<b>4 ŠÍŘENÍ TEPLA .....</b>	<b>35</b>
4.1 ZTRÁTY .....	35
4.1.1 <i>Joulovy ztráty ve vinutí</i> .....	35
4.1.2 <i>Ztráty v železe</i> .....	36
4.1.3 <i>Mechanické ztráty</i> .....	38
4.2 ZPŮSOBY ŠÍŘENÍ TEPLA .....	38
4.2.1 <i>Sálání</i> .....	38
4.2.2 <i>Vedení</i> .....	38
4.2.3 <i>Proudění</i> .....	39
<b>5 NÁVRH VÝPOČTU OTEPLENÍ STATOROVÉHO SVAZKU A VINUTÍ.....</b>	<b>39</b>
5.1 NÁVRH VÝPOČTU OTEPLENÍ STATOROVÉHO VINUTÍ .....	39
5.2 NÁVRH VÝPOČTU OTEPLENÍ STATOROVÉHO SVAZKU .....	41



---

<b>6 KONFRONTACE ANALYTICKÉHO TEPELNÉHO NÁVRHU ELEKTRICKÉHO TOČIVÉHO STROJE SESTAVENÉHO NA ZÁKLADĚ NÁHRADNÍ TEPELNÉ SÍTĚ S VÝSLEDKY ANALÝZY METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ A MĚŘENÍ .....</b>	<b>41</b>
6.1 TEPELNÝ NÁVRH ZALOŽENÝ NA ZÁKLADĚ NÁHRADNÍ TEPELNÉ SÍTĚ .....	42
6.2 MĚŘENÍ.....	43
6.3 ANALÝZA METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ.....	43
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>45</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>46</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>1</b>

## Úvod

Každá forma přeměny energie je doprovázena určitými formami ztrát. Ztracená energie se mění na teplo, které ovlivňuje účinnost elektrických strojů [1]. Teplo je nutné odvádět ze stroje pryč, aby nedošlo k poruše stroje, nebo dokonce trvalému poškození stroje. V současné době restrukturalizace společnosti umožnila vznik konkurenčního prostředí v oblasti, která byla dříve ovládána státními monopoly. Konkurence nutí výrobní společnosti snižovat cenu elektrických strojů při zachování kvality, což vede k omezení vlastních nákladů a investic, aby si minimálně zachovaly současný tržní podíl. Ale omezení investic do údržby a obnovy elektrických strojů může mít v případě poruchy (případně trvalého poškození stroje) velké finanční následky.

Teplo se strojem odvádí pomocí chlazení. Volba způsobu chlazení a chladicího média, je závislá na mnoha faktorech, jako jsou parametry stroje, prostředí, ve kterém bude stroj svou činnost vykonávat, rozměry a velikosti napájecího napětí. Chladicí podsystem stroje zkrátka musí být vybrán tak, aby teplo efektivně stroj opouštělo a nemělo příležitost poškodit na teplo náchylné části stroje.

Výroba asynchronních strojů vysokonapěťových je v současnosti vyhledávána v podobě např. motorů do trolejbusu. Vysokonapěťové stroje musejí splňovat vyšší nároky na teplotní odolnost elektroizolačního systému elektrických točivých strojů a proto je také velmi důležitým komponentem zrovna izolační systém.

Tato práce je zaměřena na šíření tepla asynchronním strojem. V první části práce jsou popsány druhy elektrických točivých strojů. Pro možnost popsání šíření tepla, je proveden rozbor jednotlivých podsystemů asynchronního stroje v následující kapitole. Dále jsou popsány izolační systémy asynchronních strojů, technologie, které se momentálně používají při výrobě izolačních systémů a možnost využití nano materiálů v izolaci stroje. V kapitole čtvrté jsou popsány jednotlivé ztráty, ke kterým ve stroji dochází. V té samé kapitole je popsán způsob jak se ztráty v podobě tepla strojem šíří. V páté kapitole je popsán návrh na výpočet oteplení statorového svazku a vinutí. Na závěr jsou konfrontovány způsoby tepelných návrhů elektrických točivých strojů.

## Seznam symbolů a zkratk

$A$ .....	Průřez materiálu [ $m^2$ ]
$A_B$ .....	Činitel sání [ $W \cdot ^\circ C^{-4} \cdot m^{-2}$ ]
$B$ .....	Amplituda sinusově se měnící indukce v části, kde se určují ztráty [ $T$ ]
$C$ .....	Kapacita kondenzátoru [ $F$ ]
$C_0$ .....	Kapacita kondenzátoru, kde je dielektrikum vakuum [ $F$ ]
$c$ .....	Měrné teplo [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$c_s$ .....	Relativní sálání [–]
$d$ .....	Délka [ $m$ ]
$E$ .....	Intenzita elektrického pole [ $V \cdot m^{-1}$ ]
$E_p$ .....	Elektrická pevnost [ $V \cdot m^{-1}$ ]
$F_m$ .....	Magnetomotorická síla [ $A$ ]
$f$ .....	Frekvence [ $Hz$ ]
$G$ .....	Hmotnost části [ $kg$ ]
$i$ .....	Okamžitá hodnota proudu [ $A$ ]
$I_{ef}$ .....	Efektivní hodnota proudu [ $A$ ]
$k_p$ .....	Činitel respektující zvětšení ztrát [–]
$l$ .....	Délka [ $m$ ]
$n$ .....	Otáčky rotoru
$n_s$ .....	Synchronní otáčky
$\Delta P$ .....	Tepelný tok [ $W$ ]
$\Delta P_{celk}$ .....	Celkové ztráty [ $W$ ]
$\Delta P_h$ .....	Hysterezní ztráty [ $W$ ]
$\Delta P_i$ .....	Dielektrické ztráty [ $W$ ]
$\Delta P_{mag}$ .....	Magnetické ztráty [ $W$ ]
$\Delta P_v$ .....	Ztráty vířivými proudy v železe [ $W$ ]
$\Delta P_{vent}$ .....	Ventilační ztráty [ $W$ ]
$Q$ .....	Množství tepla [ $J$ ]
$q$ .....	Ztráty v částech vinutí [ $W \cdot m^{-3}$ ]
$R$ .....	Elektrický odpor [ $\Omega$ ]
$S$ .....	Stálý průřez materiálu [ $m^2$ ]
$s$ .....	Průřez vodiče [ $m^2$ ]

---

$t$ .....	Čas [s]
$tg\delta$ .....	Ztrátový činitel [–]
$U_{ef}$ .....	Efektivní hodnota napětí [V]
$U_m$ .....	Magnetické napětí [A]
$U_p$ .....	Průrazné napětí [kV]
$\varepsilon$ .....	Permitivita [–]
$\varepsilon_r$ .....	Relativní permitivita [–]
$\theta_t$ .....	Absolutní teplota sálajícího tělesa [°C]
$\theta_0$ .....	Absolutní teplota okolí [°C]
$\Lambda$ .....	Magnetická vodivost [H]
$\lambda$ .....	Tepelná vodivost [ $W \cdot cm^{-1}$ ]
$\mu$ .....	Permeabilita materiálu [–]
$\mu_0$ .....	Permeabilita vakua [ $H \cdot m^{-1}$ ]
$\mu_r$ .....	Relativní permeabilita [–]
$\rho$ .....	Měrný odpor vodiče [ $\Omega \cdot m^{-1}$ ]
$\Phi$ .....	Magnetický tok [Wb]
$\sigma$ .....	Proudová hustota [ $A \cdot mm^{-2}$ ]
$\omega$ .....	Úhlová rychlost [ $rad \cdot s^{-1}$ ]

# 1 Elektrické točivé stroje

Elektrické stroje točivé pracují jako zařízení na přeměnu energie. Využívají princip elektromagnetické indukce. V elektrických strojích chápeme přeměnu energie elektrické na mechanickou, při čemž se jedná o elektrické motory, nebo přeměnu energie mechanické na elektrickou, což jsou generátory.

Každá forma přeměny energie je doprovázena určitými formami ztrát (ztráty budou podrobněji popsány v kapitole 4.1 této bakalářské práce). Ztracená energie se mění na teplo, které ovlivňuje účinnost elektrických strojů [1]. Teplo je nutné odvádět ze stroje pryč, aby nedošlo k poruše stroje, nebo dokonce trvalému poškození stroje.

Točivé stroje se skládají ze dvou základních částí, statoru a rotoru. Stator je část pevná, nepohyblivá a je složená z nosné konstrukce stroje, plechů a vinutí. Rotor je pohyblivá část stroje, která se skládá z hřídele.

Dle charakteru napájecího napětí lze stroje rozdělit na ty, které využívají střídavého napětí a dále na ty, které využívají napětí stejnosměrného. Stejnosměrného napětí využívají stroje stejnosměrné. Napětí střídavé využívají stroje asynchronní a stroje synchronní.

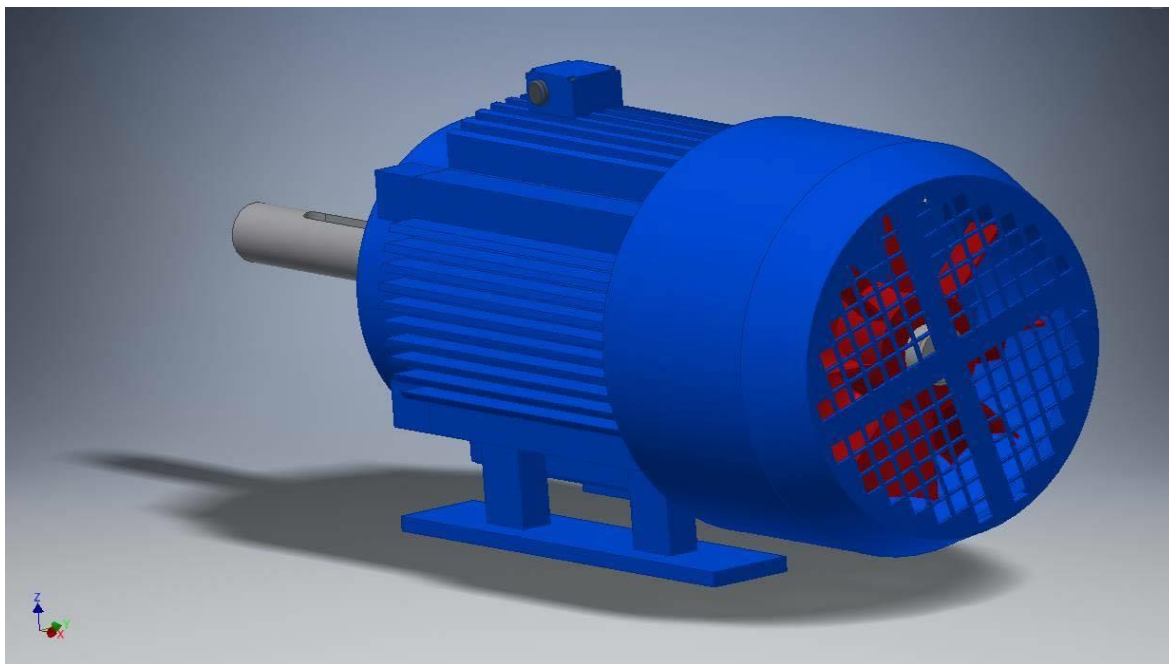
Podle počtu fází elektrické stroje mohou být jednofázové, dvoufázové a třífázové, popřípadě i vícefázové [1], [2].

Další dělení je možné podle velikosti napájecího napětí (ČSN 330010 (330010)) a to na elektrické stroje nízkonapětové a vysokonapětové [2], [3].

## 1.1 Asynchronní stroje

Asynchronní stroje jsou nejjednodušší, nejpoužívanější a nejlevnější elektrické stroje. Nejčastěji se používají jako motory, například jako trakční. Jsou nejrozšířenějšími elektromotory také proto, že jsou provozně nejspolehlivější a vyžadují malou údržbu. Napájeny jsou střídavým napětím. Rychlost asynchronních motorů se obtížně reguluje, proto se využívají k pohonu zařízení, která pracují při konstantní rychlosti (čerpadla, ventilátory)

[1]. Nejpoužívanější asynchronní motory využívají klecového rotorového vinutí (nakrátko).



Obr. 1.1 Asynchronní stroj

V generátorickém režimu se používají velmi zřídka. Asynchronní generátory najdeme například v malých vodních elektrárnách [1], [7].

Asynchronní stroj využívá principu točivého magnetického pole, indukovaného napětí a silového působení magnetického pole na vodič s proudem [11]. Díky využívání principu indukovaného napětí se také často nazývá strojem indukčním [9]. Název asynchronní stroj získal díky tomu, že se magnetické točivé pole statoru netočí stejnou (synchronní) rychlostí jako magnetické pole rotoru. Aby se rotor asynchronního stroje otáčel, musí mít rychlost nižší než synchronní. Mírou asynchronismu, rozdíl otáček synchronních a otáček rotoru, se nazývá skluz. Ten je dán vztahem [5], [8]:

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

Hlavní části asynchronního stroje, jako všech točivých strojů, jsou stator a rotor.

Stator je v podstatě část stroje, která je statická, nepohyblivá. Je složen z elektrotechnických plechů, které jsou naskládány na sebe a utvářejí tvar dutého válce. Po celém obvodu vnitřní strany tohoto válce jsou drážky, do kterých se ukládá statorové vinutí.

Na začátku i na konci těchto vinutí, je svorkovnice, kde se všechna vinutí spojují. Spojují se buď do hvězdy, nebo to trojúhelníku [9].

Rotor je pohyblivá (rotující) část stroje. Skládá se ze hřídele a válce, který je na hřídeli nasunut a je složen z elektrotechnických plechů. Po svém vnějším obvodu má drážky na uložení vinutí. U asynchronního stroje bývá vinutí provedeno dvojitým způsobem. Buď může být spojený nakrátko (klecové vinutí) se statorem, nebo může být rotor kroužkový [7], [8], [9].

Větší asynchronní stroje se používají jako rozběhové motory hydrogenerátorů, zejména v přečerpávacích vodních elektrárnách a k rozběhu zkratových generátorů [9].

Podrobně se problematikou konstrukce asynchronních strojů zabývá např. [3], [4], [5], [7], [15].

## 1.2 Synchronní stroje

Stroje synchronní mají otáčky točivého magnetického pole stejné, synchronní, jako otáčky rotoru. Nejčastěji jsou využívány jako generátory pro výrobu elektrické energie, ale mohou být využity i jako synchronní motory. Jsou využívány například jako hydrogenerátory, nebo turbogenerátory. Dají se dělit na alternátory, motory, či kompenzátory [4], [5].

Pro činnost synchronního turboalternátoru, či hydroalternátoru, se vybudí stejnosměrným proudem vinutí umístěné na rotoru, vzniká točivé magnetické pole a ve statorovém vinutí se indukují střídavé napětí. Nezbytnou částí synchronních alternátorů je budič. Budičem se nazývá zdroj stejnosměrného napětí, který napájí vinutí rotoru [11]. Jako budič se používá dynamo.

U synchronního motoru je statorové vinutí napájeno střídavým proudem. Rotorové vinutí, které se skládá ze soustavy pólů, se napájí stejnosměrným proudem. Ve statorovém vinutí vzniká točivé magnetické pole, které společně s magnetickým polem rotoru vytvoří moment síly. Střední hodnota tohoto momentu je nulová a rotor se netočí. Musí být roztočen

na synchronní otáčky, což se provádí pomocným asynchronním motorem [10].

Stator synchronního stroje je v podstatě stejný jako stator u asynchronního stroje. Jedná se o válec z elektrotechnických plechů, který má z vnitřní strany drážky, do kterých se ukládá vinutí.

Díky uspořádání rotoru se rozeznávají synchronní stroje. Rozlišují se stroje, kde je rotor s vyjádřenými (vyniklými) póly a stroje kde je rotor hladký. S vyjádřenými póly mají stroje na hřídeli nasunuto magnetové kolo, kde jsou připevněny póly s pólovými nástavci. Na jednotlivých pólech je navinuto budící vinutí. Tato všechna vinutí jsou zapojena do série. Začátky i konce jsou připevněna dvěma kroužky na hřídeli a jsou přes kartáče napájeny stejnosměrným proudem. Stroje s hladkým rotorem mají rotor v podobě pevného válce. Na povrchu jsou podélné drážky, ve kterých je uloženo soustředné budící vinutí tak, aby se rotor dvoupólově magnetoval [7], [10], [11].

Podrobně se problematikou konstrukce synchronních strojů zabývá např. [3], [4], [5], [15].

### 1.3 Stejnosměrné stroje

Stejnosměrné elektrické stroje jsou nejstaršími typy elektrických strojů. Mohou být rozděleny dle provedení buzení na stroje s permanentními magnety a stroje s buzenými póly. V prvopočátcích byly využívány jako generátory stejnosměrného proudu (dynama). Dnes se používají k přeměně elektrické energie na mechanickou, tedy jako motory [1].

Stejnosměrný stroj pracuje na základě indukčního zákona pro vodič, který se pohybuje v magnetickém poli. To platí pro dynamo, tedy generátorický režim. Pro motorický režim využívá stejnosměrný motor účinků síly magnetického pole na vodič, kterým protéká proud [12].

Stator stejnosměrného stroje už není složen z elektrotechnických plechů. Na statoru jsou umístěny hlavní póly s budícím vinutím a mezi hlavními póly jsou ještě umístěny póly pomocné. Pomocné póly zlepšují komutační vlastnosti stroje. Hlavní póly jsou složeny



z pólového jádra a pólového nástavce [13].

Rotor je složen z izolovaných elektrotechnických plechů. V drážkách rotoru je umístěno stejnosměrné vinutí. Cívky vinutí jsou připojeny na lamely komutátoru, který se nachází na hřídeli stroje. Do vinutí se přivádí proud přes kartáče, které jsou umístěné ve speciálních držácích a dosedají na komutátor [13].

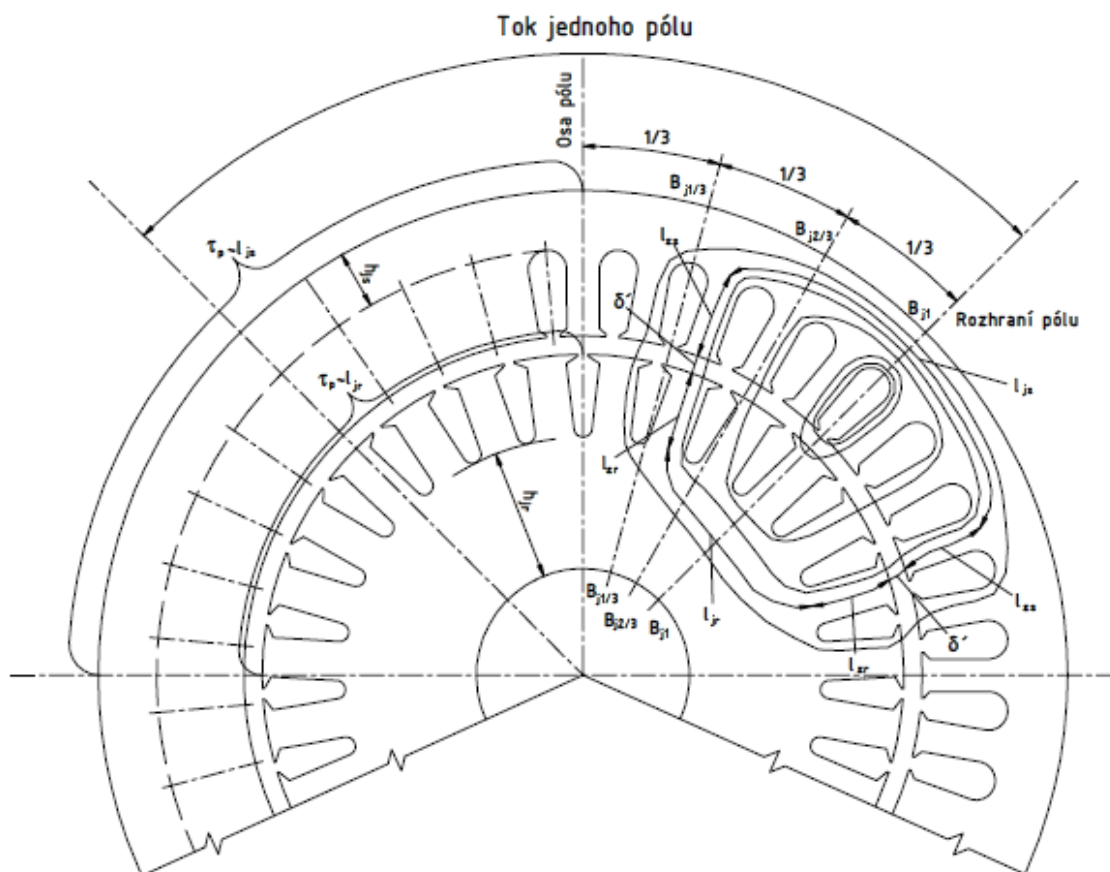
Momentálně jsou stejnosměrné stroje už méně využívány, než tomu bylo dříve. Stále se využívají u těžních strojů, obráběcích strojů, v automobilovém průmyslu, nebo jako motory trakční ale bývají nahrazovány stroji střídavými. Je to dáno jejich složitostí oproti například strojům asynchronním, jejich náklady na výrobu a tím, že mají také nákladnější údržbu [12], [13].

Podrobně se problematikou konstrukce stejnosměrných strojů zabývá např. [4], [5], [15].

## 2 Podsystemy asynchronního stroje

Asynchronní stroje se skládají z několika podsystemů, které se rozdělují na podsystemy magnetické, mechanické, elektrické, dielektrické a chladicí. Jednotlivé podsystemy, jejich složení a funkce, budou popsány v této kapitole.

### 2.1 Magnetický podsystem



Obr. 2.1 Typický magnetický obvod asynchronního motoru s klecí nakrátko převzato z [7]

Podsystemem magnetickým nazýváme ty části stroje, které uzavírají magnetický obvod. Ve statorových zubech vzniká magnetický tok  $\Phi$  [Wb], který přes vzduchovou mezeru projde do rotorových zubů, otočí se rotorovým jhem a zuby zpátky do vzduchové mezery stroje. Uzavírá se přes zuby statoru a jho statoru [5], [7]. Magnetický obvod asynchronního stroje se tedy dělí na tyto části: vzduchová mezer, zuby statoru a rotoru, jho statoru a rotoru [3].

V magnetickém obvodu se uplatňuje Hopkinsonův zákon, kde je dán magnetický tok součinem magnetomotorické síly  $F_m$  [A] a magnetické vodivosti obvodu  $\Lambda$  [H] [5].

$$\Phi = F_m \Lambda \quad (2.1)$$

V magnetickém obvodu, který je uzavřen, se magnetomotorická síla udává součtem magnetických napětí  $U_m$  [A] jednotlivých úseků [4], [5].

$$F_m = \sum U_m \quad (2.2)$$

Pro jednotlivé úseky se uvažuje stálý průřez  $S$  [m<sup>2</sup>] po celé délce  $l$  [m] a permeabilita hmoty  $\mu$  [-]. Těmito veličinami je dána magnetická vodivost, jako [5]:

$$\Lambda = \mu \frac{S}{l} \quad (2.3)$$

Permeabilita hmoty je dána součinem relativní permeability  $\mu_r$  [-] a permeability vakua  $\mu_0$  [H. m<sup>-1</sup>] [5].

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.4)$$

Permeabilita vakua  $\mu_0$  [H. m<sup>-1</sup>] [5].

$$\mu_0 = 0,4\pi \cdot 10^{-6} \quad (2.5)$$

Magnetický obvod statoru asynchronního stroje se skládá ze zubů a jha statoru. Drážky pro vinutí má na vnitřní straně obvodu [5], [7]. Pro magnetický obvod stroje se používají tenké plechy s vysokým elektrickým odporem pro zmenšení ztrát vířivými proudy a s co nejlepší magnetickou vodivostí [14]. Jsou to plechy z oceli s přídavkem křemíku a o tloušťce 0,5 mm, které jsou vzájemně izolovány. Plechy jsou izolovány a skládány z důvodu změny magnetického toku v magnetickém obvodu stroje. V případě konstantního magnetického toku může být magnetický obvod jeden souvislý odlitek (např. u stejnosměrných a synchronních strojů) [4], [7]. Rotor je složen z elektrotechnické oceli a má drážky pro vinutí na vnější straně svého obvodu [7].

Velikost vzduchové mezery v asynchronním stroji předurčuje jeho energetické ukazatele [7]. Je-li menší, je menší i magnetický odpor a magnetické napětí celého stroje. Je

tudíž malý magnetizační proud a díky tomu jsou menší ztráty statorového vinutí. Nicméně zmenšování vzduchové mezery přináší nárůst amplitud pulsací indukce ve vzduchové mezeře a přináší zvětšení povrchových a pulzních ztrát. Účinnost asynchronního stroje s malou vzduchovou mezerou je tedy často nižší [4], [7].

## 2.2 Mechanický podsystém

Mechanický podsystém se skládá z kostry stroje, chladicího žebrování, svorkovnice, ventilátoru, čel s ložisky, přírub a patek. Asynchronní stroje se již vyrábějí především zavřené s vlastním chlazením. Uvnitř asynchronního stroje je ventilátor, jenž ochlazuje stroj vzduchem. Motor bývá obvykle úplně zavřený. Z vnějšku jsou na povrchu motoru chladicí žebra nebo kanály. Pro lepší chlazení se vhání vzduch na vnější povrch pomocí ventilátoru nasazeným vně motoru na hřídeli. Asynchronní stroje mohou mít buď štítová, nebo stojanová ložiska. Pro malé a střední stroje se využívá ložisek štítových. Pro stroje velké jsou používána ložiska stojanová. Na kostře stroje jsou většinou čtyři patky na připevnění stroje na nějaký pevný základ. U malých a středních strojů se k upevnění využívá, mimo patky, spojení přírubou s poháněným zařízením. U asynchronních strojů se většinou používá vodorovný hřídel [5]. Kryt se používá především pro zamezení nebezpečného dotyku, proti vniknutí cizích předmětů a také jako ochrana před vniknutím vody [15].

## 2.3 Elektrický podsystém

Pod elektrický podsystém se řadí části stroje, které umožňují průchod elektrického proudu. Průchod elektrického proudu zajišťuje vinutí stroje. Vinutí asynchronního stroje je uloženo ve statoru a rotoru. Pro stator se užívá jiného druhu vinutí než pro rotor. Vinutí je tvořeno z vodičů. Jako materiál používaný pro vodiče asynchronního stroje slouží především měď a hliník. Tyto vodiče jsou většinou kruhového nebo pravoúhlého průřezu. Menší průřezy vodičů se vyrábí s kruhovým průřezem a větší průřezy s průřezem pravoúhlým (obdélníkovým). Rozměry kruhových nebo pravoúhlých vodičů jsou normalizovány ((421502) ČSN EN 13601 a závisí od výkonu elektrického stroje resp. proudu, který bude procházet vodičem. Rotorové vinutí bývá u asynchronních strojů zpravidla jako klecové vinutí, nebo jako kroužkový rotor [4], [5].

### 2.3.1 Vinutí statoru asynchronního stroje

Pro vinutí statoru asynchronního stroje se využívá vinutí jednovrstvová, při čemž je

v drážce uložena jen jedna strana cívky, nebo vinutí dvouvrstvá, kde jsou cívkové strany dvě v každé drážce. Rozlišuje se také vinutí cívkové a vinutí tyčové. Vkládání vinutí do drážek se provádí vsypáváním, prošíváním a zasouváním do polozavřených drážek, nebo vkládáním do otevřených drážek [4], [15].

Vkládání vsypávaných vinutí se provádí vložením jednotlivých cívek vinutí do drážek stroje přes drážkové otevření. Vodiče vinutí mohou být kruhového nebo obdélného průřezu. Vodiče obdélného průřezu lépe využívají drážky, a proto se používá častěji [15]. Uzavření drážky je uskutečněno pomocí tvarovaných víček z lesklé lepenky nebo z tvrzené skelné tkaniny u vodičů kruhového průřezu. U vodičů obdélného průřezu se používají klíny z dřeva nebo tvrzeného papíru [15].



*Obr. 2.2 Asynchronní motor 7kW (vinutí vsypávané) převzato z [16]*

Prošívání vinutí se „prošívají“ skrze uzavřené izolační objímky a následně se v navíjeném stoji tvarují do konečného tvaru. V dnešní době se již tato metoda téměř nepoužívá [4], [15].

Zasouvaná vinutí jsou cívky z plochých vodičů a jsou na jedné straně zastříhány. Navinutí se provádí napříč drážkou, nebo podél drážky [15].

Vinutí vkládaná do otevřených drážek se využívají u středních a velkých asynchronních strojů. Používá se vinutí cívkové a tyčové. U velkých strojů se využívají především tyčová vinutí. Tyto tyčová vinutí se nejobvykleji vyrábějí v podobě Roeblových tyčí [15].

### **2.3.2 Vinutí rotoru asynchronního stroje**

Rotorové vinutí asynchronního stroje se provádí v dvou úpravách. Rotory nakrátko a rotory kroužkové [3], [5], [15].

#### **2.3.2.1 Asynchronní rotory nakrátko**

Vinutí rotorů nakrátko se někdy může skládat z několika druhů kovu. Nejčastěji se používá hliník, měď, bronz nebo mosaz. Tyče rotorového vinutí se vkládají do drážek a poté se spájí s kruhy nakrátko. Rotor nakrátko musí vydržet určité mechanické a tepelné namáhání [15].

#### **2.3.2.2 Asynchronní kroužkové rotory**

Rotorové vinutí je trojfázové. Začátky vinutí jsou vyvedeny na kroužky, které jsou na hřídeli. Na kroužky dosedávají sběrací kartáče, které slouží ke změně odporu a tím zmenšení nebo zvětšení záběrného proudu, otáček či záběrného momentu [17]. Vinutí jsou většinou cívková nebo tyčová [15].

## **2.4 Chladicí podsystem**

Chladicí podsystem v asynchronním stroji, stejně jako ve všech točivých strojích, zastává důležitou roli při správném fungování stroje, efektivním odvodu ztrátového tepla ze stroje (způsoby šíření tepla v elektrických strojích točivých jsou popsány v kapitole 4). Je také důležitý z hlediska životnosti jistých částí stroje, jejichž materiálové charakteristiky se s rostoucím teplem mění k horšímu, především to platí u izolace (elektroizolační systémy jsou popsány v kapitole 3). Chlazení může být provedeno různými způsoby. Jako chladicí médium se používá voda, olej, nebo plyny (převážně vodík). Velmi často je na stroji přítomný ventilátor, který pomáhá chlazení stroje vzduchem.

Podle směru chladicího média v elektrických strojích známe tři základní druhy chlazení: axiální, radiální a axiálně-radiální chlazení, které jsou popsány [4], [15]. Oběh chladicího média může být otevřený nebo uzavřený. Chlazení může být také děleno na přímé a nepřímé chlazení. Dále budou podrobněji popsány některé druhy chlazení.

#### **2.4.1 Přirozené chlazení**

Teplo se ze stroje odvádí přirozeným prouděním vzduchu, což znamená, že k chlazení stačí vlastní přenos tepla materiálu z vinutí, přes vzduchovou mezeru až k žebrům. Činnost ventilátoru tudíž vykonávají žebra. Chlazení může být i jen povrchové, kdy je teplo odváděno ze stroje do okolí z povrchu uzavřeného stroje. Tohoto chlazení se užívá především u menších strojů [15].

#### **2.4.2 Vlastní chlazení**

Pro odvádění tepla přispívá ventilátor připevněný na hřídeli. Vzduch je tedy efektivněji vháněn pro ochlazování stroje. Účinek ventilátoru je závislý na otáčkách stroje. Užívá se u strojů, kterým nestačí přirozené proudění vzduchu.

#### **2.4.3 Cizí chlazení**

Ventilace je v podstatě jako cizí zdroj. Tudíž není závislá na otáčkách stroje. Ventilátor vhání vzduch do stroje. Také se může jednat o chlazení chladicím médiem (např. vodou, plynem), která se do stroje dostává zařízením, které je nezávislé na stroji (má svůj vlastní zdroj) [15].

#### **2.4.4 Průtahová ventilace**

Teplo chlazeného stroje je neustále předáváno vzduchovému proudu, který proudí strojem. Do stroje je celou dobu vháněn čerstvý vzduch. Do stroje se mohou ale také dostat nečistoty, tudíž se nepoužívá tento typ chlazení v prašném prostředí [15].

#### **2.4.5 Kapalinové chlazení**

Důležitý faktor u kapalinového chlazení je utěsnění. Stroj může být ponořen do kapaliny nebo jí může být obtékán. Přímé chlazení kapalinou je metoda, kdy kapalina protéká dutinou v cívce, nebo ve vodiči. Jako chladicí médium bývá používána nejčastěji voda. Voda má

řádově vyšší hodnoty koeficientu přestupu tepla (výsledek rychlejší ochlazení stroje) v porovnání se vzduchem, což může být považováno za výhodu. V současnosti mezi nevýhody chlazení vodou se řadí i náklady spojené s vodním hospodářstvím (např. údržba, provoz).

### 2.4.6 Chlazení plynem

Přímé chlazení plynem se nazývá chlazení, když plyn protéká přímo dutinou v cívce, nebo ve vodiči. Jako chladicí médium se používá vodík [15]. Mezi nevýhody chlazení plynem patří např. složité plynové hospodářství, jako problémy s utěsněním strojů (vodík a hélium unikají rychleji než vzduch). Vodík je ve směsi se vzduchem výbušný, což vede k návrhu stroje jako výbuchu odolného. Další nevýhodou je to, že součinitel přestupu tepla (Tab. 2.1) narůstá s tlakem, což vede k nárůstu i ventilačních ztrát (popsány v kapitole 4.1).

Tab. 2.1 Hodnoty součinitelů přestupu tepla nucenou a přirozenou konvekcí

Látka	$\alpha_{konv}$ (nucenou konvekcí) [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	$\alpha_{konv}$ (přirozenou konvekcí) [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
Plyny	25 - 250	2 - 25
Kapaliny	50 – 20 000	50 – 1 000

## 2.5 Základní ventilační výpočty

Ventilační výpočet elektrického stroje vychází ze základních zákonů. K základním ventilačním výpočtům se používají tyto vztahy [4], [38].

Rovnice kontinuity [38]:

$$Q = S \cdot v = konst. \quad (2.6)$$

Kde  $Q$  je objemový průtok,  $S$  průřez kanálu a  $v$  střední rychlost proudění v daném místě.

Rovnice Bernouillova [38]:

$$p_s + \frac{\rho}{2} \cdot v^2 = konst. \quad (2.7)$$

Kde  $p_s$  je statický tlak a  $\rho$  měrná hmotnost proudícího média.



Eulerova ventilační rovnice [38]:

$$H_{TH} = \rho \cdot (u_2 \cdot c_{u2} - u_1 \cdot c_{u1}) \quad (2.8)$$

Kde  $u_{1,2}$  jsou obvodové rychlosti na vstupní a výstupní straně lopatek,  $c_{u1,2}$  složky absolutních rychlostí ve směru obvodových rychlostí a  $H_{TH}$  odpovídá celkovému tlaku.

### 3 Izolační podsystém asynchronního stroje

V této kapitole budou popsány základní charakteristiky izolanů a některé materiály využívané jako izolace asynchronních strojů. Dále budou popsány izolační systémy pro nízkonapěťové stroje a vysokonapěťové stroje a technologie, které se na izolační systémy používají. V poslední části této kapitoly budou popsány možnosti použití mikro kompozitu a nano kompozitu.

V asynchronních strojích, stejně jako ve strojích točivých všeobecně, vznikají určité formy ztrát, které se přeměňují na teplo. Pokud není teplo ze stroje efektivně odváděno, může vlivem tepla dojít k poškození, nebo narušení izolace stroje. Zkracuje se její životnost. Izolační podsystém stroje je na teplotu náchylný. Je důležité, aby izolace splňovala určité požadavky, jako např. tepelnou odolnost, elektrickou a mechanickou pevnost, rezistivitu, relativní permitivitu a ztrátový činitel. Obecně elektroizolační systémy elektrických zařízení jsou složeny ze slídy, epoxidové pryskyřice (případně polyesterová pryskyřice, silikonová pryskyřice) a skleněné tkaniny nebo jiných materiálů (jako PA fólie, polyesterové fólie). Všechny tyto jednotlivé materiály nemají odpovídající elektroizolační vlastnosti, a proto se využívá elektroizolační systém - kompozitní materiál. Obecně kompozit je materiál složený ze dvou nebo více fyzikálně a chemicky odlišných fází. Tvrďší a pevnější fáze se nazývá výztuž (případně nosná část), složka, která plní funkci pojiva výztuže, se nazývá matrice. Kompozitní materiály spojením několika izolanů dohromady těchto vlastností dosáhnou snadněji a efektivněji [18].

Izolanty jsou náchylné na teplotu, proto podle normy ČSN EN 60085 jsou zavedeny teplotní třídy izolanů. Teplotní třídy se označují čísly rovnými nejvyšší teplotě ve stupních Celsia, pro které elektroizolační materiál nebo systém může být použit. V případě špatně

zvolené izolace může dojít ke zničení stroje, což je v současné době finančně náročné. Teplotní třída udává maximální teplotu, při které izolace může fungovat v dlouhodobém provozu. Označení pro teplotní třídu jsou následující:

Tab. 3.1 Teplotní třídy izolace

Rozmezí teplot		Tepelná třída	Písmenné označení	Materiály
$\geq 90$	$< 105$	90	Y	Organické materiály - bavlna, hedvábí, papír a dřevo. (impregnace)
$\geq 105$	$< 120$	105	A	Bavlna, hedvábí, dřevo, papír, tkanina přírodní, tkanina syntetická na bázi celulózy. Impregnované nebo lakované.
$\geq 120$	$< 130$	120	E	Celulózový papír, tvrzený papír, tvrzená tkanina a buničina. Impregnant fenolická nebo fenolformaldehydová pryskyřice.
$\geq 130$	$< 155$	130	B	Skleněná vlákna, azbest, sulfátový papír. Pojivo na bázi epoxidů a fenolických pryskyřic.
$\geq 155$	$< 180$	155	F	Skleněná vlákna, slídový papír, PET, PEN fólie, aramidový papír. Pojivo epoxidové a novolaké pryskyřice.
$\geq 180$	$< 200$	180	H	Aramid, polyamidy, polyestery, slída a slídový papír. Pojivo silikonová nebo modifikovaná epoxidová pryskyřice.
$\geq 200$	$< 220$	200	N	Sklo, azbest, aramidové papíry. Pojiva

				silikonová. Impregnant (lak) na bázi polyesteralkydů.
$\geq 220$	$< 250$	220	R	Aramidové papíry, skleněná vlákna. Pojivo silikonové.
$\geq 250$	$< 275$	250	-	Polyimidy, aramidy a polytetrafluoretylen. Slída, slídový papír se silikonovým pojivem.

### 3.1 Izolanty

Hlavní vlastností izolantů je klást co největší odpor průchodu elektrického proudu. Používají se k izolování vodivých materiálů s rozdílným potenciálem [19]. Jak již bylo napsáno v úvodu této kapitoly, jejich hlavní vlastnosti jsou především rezistivita, elektrická pevnost, malý ztrátový činitel a malá relativní permitivita [18], [20].

Rezistivita charakterizuje vodivostní, nebo odporové schopnosti látky, kterou protéká elektrický proud. U izolantů se určuje izolační odpor, vnitřní rezistivita a povrchová rezistivita. Izolační odpor [ $\Omega$ ] se měří po připojení napětí na elektrody a udává poměr stejnosměrného napětí, které je na elektrodách, a celkového proudu. Vnitřní rezistivita [ $\Omega \cdot \text{m}^{-1}$ ] je v podstatě odpor vystavený toku elektrického proudu skrze materiál. Povrchová rezistivita [ $\Omega$ ] je poměr mezi proudovou hustotou v povrchové vrstvě izolantu a intenzitou stejnosměrného elektrického pole. Povrchová rezistivita by měla být co nejvyšší. U dobrých izolantů dosahuje hodnot  $10^{12} \Omega \cdot \text{m}$  [19], [21].

Elektrická pevnost je schopnost materiálu vydržet určité množství elektrického namáhání, které se posuzuje podle velikosti intenzity elektrického pole [19]. V určitém bodu může intenzita elektrického pole dosáhnout kritické velikosti a v tu chvíli dojde u izolantu k poškození, které se nazývá průraz u pevných izolantů, nebo přeskok u izolantů plyných či kapalných. Napětí, při kterém k průrazu či přeskoku dojde, nazýváme průrazné napětí [18], [19]. Vztah průrazného napětí a tloušťky izolace v místě průraze je dán následujícím vzorcem [18], [19].

$$E_p = \frac{U_p}{d}, \quad (3.1)$$

kde  $E_p$  [ $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ ] je elektrická pevnost,  $U_p$  [V] je průrazné napětí a  $d$  [m] tloušťka izolace.

Ztrátový činitel vyjadřuje úhel  $\delta$ , což je míra ztracené energie v izolantu, která se přemění na teplo.

Relativní permitivita je dielektrická konstanta, která popisuje míru vlivu elektrického pole na elektrický stav dielektrika. Dle vztahu  $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$  se rozlišují permitivity na absolutní permitivitu  $\varepsilon$ , permitivitu vakua  $\varepsilon_0 (8,859 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1})$  a permitivitu poměrnou  $\varepsilon_r$  [19], [21]. Poměrná permitivita se dá učit ze vztahu pro kapacitu kondenzátoru jako poměr [18]:

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0}, \quad (3.2)$$

Kde  $C$  je kapacita kondenzátoru, u kterého je dielektrikem právě izolant s poměrnou permitivitou  $\varepsilon_r$  a  $C_0$  je kapacita kondenzátoru stejného rozměru i uspořádání, u kterého je dielektrikem vakuum [19]. Relativní permitivita popisuje polarizační schopnost u izolantů. Nepochopitelně látky jsou s relativní permitivitou pod 2,5 a látky s vyšší hodnotou relativní permitivity jsou látky polární [21].

## 3.2 Kompozitní materiály

Používají se především třísluškové kompozitní materiály. Složení třísluškových kompozitních materiálů je z plniv, pojiv a nosných materiálů. Díky tomuto složení dosahují kompozitní materiály dobrých výsledných vlastností pro izolační systém, jako jsou např. pevnost při mechanickém namáhání, odolnost vůči navlhnutí, odolnost vůči chemickým látkám, vysoká elektrická pevnost atd. [18].

### 3.2.1 Nosná složka

U třísluškových kompozitních materiálů tvoří nosná část v podstatě část konstrukční, pro kterou je hlavním úkolem zajistit dobré mechanické vlastnosti celého kompozitního materiálu. Pevnostní vlastnosti závisí na vybraném materiálu pro nosnou složku a uspořádání nosné složky v kompozitním materiálu. Jako materiál pro nosnou část se používá bavlněná

tkanina, papír, skleněná tkanina, polyesterová fólie, polyesterová rouna, polyetylenftalátová fólie (PEN) a polyetylenraftalátová fólie (PET) [18], [22].

### 3.2.2 Plniva

Plnivo u tříšložkových kompozitních materiálů zastává hlavní část a to v nějakých případech i z 80% z celkového materiálu [18]. Mezi jeho nejdůležitější vlastnosti patří vlastnosti elektroizolační a vlastnosti tepelné. Důležitá podmínka je zajištění správné kompatibility mezi nosnou částí a pojivem, aby nedošlo k nežádoucím chemickým reakcím. Jako plnivo se nejčastěji používá jeden ze dvou druhů upravené slídy a to slída rekonstruovaná. Slída rekonstruovaná se používá především jako kalcinovaný a nekalcinovaný slídový papír. Kalcinovaný papír má velmi dobré mechanické vlastnosti, naproti tomu nekalcinovaný papír je velmi nasákavý [18].

### 3.2.3 Pojiva

Pojivo (matrice) zajišťuje správné spojení všech jednotlivých částí použitého kompozitu. Určuje také způsob výroby i zpracování kompozitního materiálu. Pojivo má za hlavní úkol zajistit po zpracování stálý tvar, správný přenos sil v kompozitním materiálu a slouží také jako celková ochrana kompozitního materiálu. Pro pojivo se zpravidla používají dva základní typy organických pojiv, což jsou reaktoplastická pojiva a termoplastická pojiva. Rozdíl mezi těmito dvěma typy pojiv je v tom, že reaktoplastická pojiva se po provedené reakci vytvrdí a již je nejde dále zpracovávat či upravovat. Zatímco termoplastická pojiva se po vytvrzení dají při určité teplotě dále zpracovávat. Jako reaktoplastická pojiva jsou používány epoxidové a polyesterové pryskyřice. Jako termoplastická pojiva jsou používány např. vinylesterové pryskyřice, polystyrenové pryskyřice [18], [22].

## 3.3 Izolace nízkonapěťových asynchronních strojů

U nízkonapěťových strojů izolační systém sestává z izolace drážek, impregnantu a izolace vodičů.

### 3.3.1 Izolace drážek

Izolace drážek je používána z důvodu toho, aby se nepoškodila izolace vodičů o stěny drážek ve stroji. Pro izolace drážek se využívají vícevrstvé ohybné materiály, drážkové lepenky, Nomex, nebo různé kombinace materiálů. Drážkové lepenky jsou vyráběny ze

sběrového papíru, sulfátové buničiny a bavlněných nebo lněných hadrů. Drážková lepenka bývá ještě leštěná a hlazená a má tloušťku 1 mm - 6 mm. Jako další druhy lepenek jsou používány lepenky obyčejné a lepenky transformátorové. Lepenky obyčejné jsou vyráběné ze sběrového papíru a mají až 15% anorganických látek. Tyto lepenky mají tloušťku 1 mm - 3 mm. Transformátorové lepenky se vyrábějí ze sulfátové buničiny a dosahují až 45% nasákavosti. Vícevrstvé plošné izolanty se skládají z několika vrstev materiálů. Používané materiály mají k sobě přiřazena písmena, z nichž se zjistí výsledné složení izolantu a i celková tloušťka izolace středové vrstvy. Tyto materiály zastupuje polyetyléntereftalátová fólie (E), skleněná tkanina (S), polyamidová fólie (K), aramidový papír (A), polyesterová rohož (N), elektrotechnická lepenka (P) a slídový papír (R) [18].

Nomex je syntetický materiál, který se vyrábí z krátkých vláken a menších vláknitých částic aramidů. Je zpracováván do papírové podoby a za vysokých teplot je následně válcován, kalandrován, mezi několika válci. Má vysokou tepelnou odolnost, výbornou vnitřní rezistivitu přibližně, výbornou elektrickou pevnost a relativní permitivitu 2,5. Má vysokou pevnost v tahu, je odolný vůči chemikáliím, nehořlavý, působením tepla netaje a dokonce když je odstraněn zdroj ohně, je samozhášivý [18].

### 3.3.2 Izolace vodičů

Vodič je již opatřen izolací a poté se z něj vyrábí vinutí. Většinou se skládá z vrstvy laku, opředení bavlnou, skleněnými vlákny, nebo kombinací pevné a nanášené izolace [4], [18].

### 3.3.3 Impregnace

Impregnace se praktikuje třemi technologiemi: zakapáváním, máčením a zaplavováním. Používá se především jako ochrana vinutí stroje proti negativním chemickým, elektrickým, mechanickým vlivům a také proti vlhkosti a biologickým látkám [18].

Technologie zakapávání využívá roztoky nenasycených polyesterimidových pryskyřic, které jsou ve styrenu [18].

Máčení využívá jednosložkové polyesterové pryskyřice bez styrenu [18].

Zaplavování využívá laků na bázi nenasyčených polyesterimidových pryskyřic, jež jsou vytvrzovány ultrafialovým zářením a elektrickým proudem [18].

### 3.4 Izolace vysokonapětových asynchronních strojů

Izolování vinutí u vysokonapětových strojů se provádí ještě před vložením do otevřených drážek statoru stroje. Nároky na izolační systém u vysokonapětových strojů jsou daleko větší, než u strojů nízkonapětových. Pro výrobu izolačního systému vysokonapětových asynchronních strojů se využívají dvě technologie: Vakuově tlakové impregnace (angl. Vacuum preassure impregnation (VPI)) a Resin Rich.

Navíjení izolace na použitá vinutí u vysokonapětových strojů se provádí diskontinuálně nebo kontinuálně.

Diskontinuální navíjení je navíjení nespojitě, při kterém se navíjí fólie pouze na rovnou část vinutí (ta část, která je v drážce). Čela vinutí se následně ovinou páskou. Nevýhodou diskontinuálního navíjení je menší elektrická pevnost na přechodu mezi fólií a páskou [18], [21].

Kontinuální navíjení je navíjení spojitě a při tomto způsobu je páska navíjena s třetinovým, polovičním nebo dvoutřetinovým překrytím po celé ploše tyčí vinutí. Páska se navíjí pod tlakem a je lepidlá, tudíž její dodatečné dotažení není možné [18], [21].

#### 3.4.1 Vacuum preassure impregnation (VPI)

Jak je již z českého překladu názvu této technologie zřejmé (vakuově tlaková impregnace), jde o zpracovávání použitého materiálu ve vakuu a při vysokém tlaku [21].

Hlavním materiálem této technologie je velmi dobře savá slídová páska, která se vyrábí z nekalcinovaného slídového papíru a při impregnaci se vysoce nasytí použitým impregnantem. V této technologii se využívají kompozitní materiály, u kterých je nosná složka zastoupena skleněnou tkaninou, syntetickou fólií nebo polyesterovým rounem a pojiva se využívá minimum. Pojivo je zastoupeno přibližně 7% z celkového kompozitu a především musí být kompatibilní s použitým impregnantem. Jak již bylo zmíněno, nejdůležitějším materiálem pro tuto technologii je páska z nekalcinovaného slídového

papíru, která zaručuje vysokou savost, která je zapotřebí k prosycení všech vrstev kompozitu při následné impregnaci. Nekalcinovaná slída je velmi dobře savá, především z důvodu toho, že má vysokou hrubost zrnění. Tato slídová páska také disponuje dobrými mechanickými a izolačními vlastnostmi. Technologie VPI neobsahuje žádná tvrdidla. Jako impregnanty pro tuto technologii, jsou používány nízkomolekulární bezrozpouštědlové pryskyřice se stoprocentním obsahem sušiny (epoxidové, polyesterové, silikonové). Takovéto pryskyřice mají dobré elektrické i mechanické vlastnosti a rychle vytvrzují [18], [21].

Výroba izolačního systému pomocí této technologie může probíhat dvěma metodami. Může být impregnováno celé statorové vinutí jako celek nebo mohou být jednotlivé tyče vinutí impregnovány zvlášť. Pro technologii VPI se používá vakuotěsný a tlakotěsný kotel, ke kterému je připojeno ohřívací a chladicí zařízení. Ke kotli je připojen i zásobník s impregnantem. Mezi kotlem a zásobníkem impregnantu je také ohřívací a chladicí zařízení. Finální část je sušárna, kde se stator nebo statorové vinutí, při proudění horkého vzduchu za stálého otáčení dosuší [18], [21].

### 3.4.2 Resin Rich

Resin rich je technologie ve které se používají předimpregnované pásy s velkým obsahem pryskyřice. Páska pro tuto technologii již obsahuje pojivo, pryskyřici, ve stavu „B“ (předtvrzený stav). Základním materiálem pro technologii resin rich je tříložkový kompozit s předimpregnovaným materiálem, který obsahuje 20 % – 40 % pojiva. Jako nosná část kompozitu je skleněná tkanina, polyethylterephtalát (PET) fólie nebo polyethylenaphthalátová (PEN) fólie [23]. Část, která slouží, jako izolace bývá kalcinovaný nebo nekalcinovaný slídový papír. Jako pojivo se používá reaktoplastická bezrozpouštědlová novolaková pryskyřice nebo cykloalifatická epoxidová pryskyřice. Jak bylo již zmíněno, tento kompozit se již dodává ve stavu „B“ (předtvrzený stav) a aby nedošlo k slepení navíjených částí, používá se při navíjení separační fólie [18].

Páska se navíjí na vinutí diskontuálním nebo kontinuálním způsobem. V další fázi se páska stlačí na požadovanou tloušťku a vytvrzuje se ve speciálních lisech, kde je zvýšený tlak a teplota, aby došlo k zesílení pryskyřice. Před následným lisováním se izolace vysuší, aby došlo k odstranění vlhkosti. K lisování se používá předeřhřátá forma, v které dosáhne vinutí teploty 100 °C a pryskyřice se dostane do gelového stádia. V gelovém stádiu se spojí



všechny složky izolace a forma se následně dotáhne na požadovanou tloušťku izolace. Poté se ve formě zvýší teplota přibližně na 170 °C, při níž se přibližně po hodině finálně vytvrdí izolace. Následně se pozvolně vinutí ochlazuje. Jakmile vinutí vychladne, je ovinuto polovodivou páskou, nebo upraveno polovodivými laky, aby se eliminovaly částečné výboje [18].

### 3.5 Možnost využití nanoplňiv

V současné době se v řadě průmyslových odvětví, výrobních technologií, ve vědě a výzkumech objevuje často předložka nano-. Kompozity se mohou podle rozměrů plniva dělit na nano, mikro a makro kompozity [24]. Nanokompozitní materiály mají rozměr vyztužující fáze v jednotkách nm. Mikrokompozitní materiály se používají dnes nejčastěji a mají rozměry od  $10^0 \mu\text{m}$  do  $10^2 \mu\text{m}$ . Makrokompozitní materiály mají největší rozměry a to od  $10^0 \text{mm}$  do  $10^2 \text{mm}$  [24], [25]. Výzkum nanokompozitu a nano materiálů patří k rychle se rozvíjející oblasti v posledním dvacetiletí. U nanokompozitů můžeme sledovat určité vlastnosti, které se liší od běžně používaných materiálů. Jak již bylo v úvodu této kapitoly napsáno, izolační systémy točivých strojů jsou v dnešní době prováděny především pomocí kompozitních materiálů. Ale stále je snaha nějakým způsobem stávající elektroizolační systémy zdokonalit. Mnoho vědeckých týmů již řadu let na tomto zdokonalování pracuje a publikuje své výsledky. V této části bakalářské práce se pokusím shrnout výsledky zlepšení elektroizolačních systémů pomocí nanomateriálů.

U nanokompozitů je molekulový pohyb silnou vazbou mezi nanoplňivem a základní složkou omezen. Díky tvorbě nano paprscitých útvarů a díky zachytávání nábojů plnivy, se zmenšují volné cesty a zmenšuje se i nárazová ionizace. V dnešní době nejvíce zkoumané materiály se řadí polymerové materiály, které jsou plněné malým množstvím nanoplňiv. Nanokompozity mají určité vlastnosti, kterými se liší od mikrokompozitních materiálů. Díky přidání určitého množství nanoplňiva, probíhají výzkumy na ovlivnění mechanických, elektrických a tepelných vlastností izolačních materiálů [24].

Permitivita se s přidáním nanoplňiva zmenší, ale jen ve chvíli kdy jsou nanočástice rozptýleny rovnoměrně. Může dojít ale také k zvýšení permitivity, z důvodu obsahu nečistot a příměsí nebo nerovnoměrného rozptýlení plniva a vzniku shluku částic [24], [25].

Je potřeba neustále pracovat na zdokonalování technologie výroby, proto další možností je využití nano vláken, což popisují autoři článku [25]. Autoři použili polyamidové nanovlákná pro modifikaci běžně používaných elektroizolačních systémů (epoxidová pryskyřice, skleněná tkanina a slída). Získané výsledky ukázaly zajímavé chování zejména v elektrickém poli. Modifikované kompozity se vyznačují pozoruhodnými nižšími hodnotami ztrátového činitele. Kromě toho, zatímco rázová pevnost některých upravených kompozitů se zvyšuje (asi 17 %), dielektrická pevnost zůstává stejná nebo lepší, než autoři očekávali.

Ztrátový činitel  $\text{tg } \delta$  s nanoplňivem oxidu titaničitého je snížený při vyšších teplotách a při nízkých frekvencích. Zatímco oxid křemičitý ovlivňuje  $\text{tg } \delta$  jiným způsobem. S tímto nanoplňivem je ztrátový činitel menší hodnoty než čistá epoxidová pryskyřice, ale ztrátový činitel roste při frekvencích vyšších než 100kHz [24].

Prostorový náboj byl u mnoha kompozitů s nanoplňivou prokazatelně snížen. Nanoplňiva zlepšují elektrickou pevnost ve střídavém poli [24], [25].

Elektrická pevnost přidáním nanoplňiva na místo mikroplňiva není tolik ovlivněna. Nanokompozity nevykazují skoro žádnou změnu ve stejnosměrné krátkodobé elektrické pevnosti, až do přidání minimálně 10 % hmotnosti nanoplňiva [24].

U nanokompozitu polyamid – vrstvený křemičitan byla vyzkoumána odolnost vůči částečným výbojům [25].

Zlepšení tepelné vodivosti pomáhá odvádění přebytečného tepla do chladicího média. Nanoplňiva polyetylenových vláken mají velmi vysokou tepelnou vodivost a tudíž pomáhají lepšímu odvodu tepla a snižují stárnutí izolace [24].

Autoři článku [26] se zabývali studiem vlastností nanokompozitů na bázi epoxidové pryskyřice plněné 1 % nanočástic oxidu křemičitého (hydrofobní a hydrofilní). Výsledky ukazují, že hydrofobní oxid křemičitý v kombinaci s vodou má velmi málo nebo dokonce žádné vodíkové vazby a proto bude mít lepší elektrické vlastnosti (index polarizace, vnitřní odpor, ztrátový činitel a dielektrická pevnost) než hydrofilní oxid křemičitý. Také hodnoty součinitele tepelné vodivosti jsou vyšší v porovnání s materiálem, do kterého byl přidán

hydrofilní oxid křemičitý.

Protože je elektroizolační systém velice důležitý pro činnost elektrických točivých strojů a nejvíce je ovlivněn tepelnými vlastnostmi materiálu a tepelnými podmínkami jak provozními tak i okolními, tak je následující kapitola zaměřena na šíření tepla v elektrických strojích.

## 4 Šíření tepla

V úvodu této kapitoly budou popsány druhy ztrát, které ve stroji vznikají, kde k nim dochází, a jakým způsobem v podobě tepla se strojem šíří. Teplo se strojem šíří vedením (kondukcí), prouděním (konvekci) a sáláním (radiací, zářením) [27]. Odvádí se do chladicího média.

### 4.1 Ztráty

Do elektrického stroje se dodává energie (příkon), při jejíž přeměně na výkon mechanický dochází ke vzniku ztrát. Vzniklé tepelné ztráty je nutné ze stroje odvádět, aby nedošlo k poruše stroje. Ztráty v elektrickém stroji vznikají v různých částech a jsou různého charakteru. Výpočet celkových ztrát ve stroji se dá popsat zjednodušeným vztahem [4], [5].

$$\Delta P_{celk} = \Delta P_{Cu} + \Delta P_h + \Delta P_v + \Delta P_{vent} + \Delta P_{mag} + \Delta P_i, \quad (4.1)$$

kde  $\Delta P_{celk}$  [W] jsou ztráty celkové,  $\Delta P_{Cu}$  [W] jsou Joulovy ztráty ve vinutí,  $\Delta P_h$  [W] hysterezní ztráty v železe,  $\Delta P_v$  [W] ztráty vířivými proudy v železe,  $\Delta P_{vent}$  [W] ventilační a mechanické ztráty,  $\Delta P_{mag}$  [W] ztráty vířivými proudy a  $\Delta P_i$  [W] dielektrické ztráty.

#### 4.1.1 Joulovy ztráty ve vinutí

U vinutí, kterým prochází proud, vznikají Joulovy ztráty a jsou dány odporem tohoto vinutí. V čelech cívek, které leží mimo magnetický obvod, a proto se do nich neindukuje napětí, vznikají ztráty. Tyto ztráty čela oteplují a snižují účinnost stroje. Čela se navrhují tak, aby jejich délka byla co nejmenší a aby vzdálenost mezi jednotlivými čely cívek byla konstantní [4], [5].

Ve vinutí vznikají i ztráty vířivými proudy. Do výpočtu odporu vinutí je dosazován do empirického vzorce Emdeho činitel, jenž respektuje ztráty, které vznikají ve vinutí vířivými proudy. Vířivé proudy jsou sčítány s proudem střídavým, díky čemuž je proudová hustota ve vodičích nerovnoměrně rozdělena. V železných konstrukcích se tyto ztráty nedají přesně určit, kvůli rozptylovým magnetickým tokům a proto se při výpočtech využívá větší hodnoty Emdeho činitelů. Ztráty Joulovo i ztráty vířivými proudy mohou dosahovat vysokých hodnot. Pro zmenšení těchto ztrát se používají permutovaná tyčová vinutí (Roeblovy tyče). Díky tomuto tyčovému vinutí vzrůstá měrný odpor vodiče, ztráty s oteplením klesají a rozdělení proudu je proto v průřezu daného vodiče rovnoměrnější. Oteplení vinutí je závislé na více faktorech, jako např. způsob chlazení, druh chladiva atd. [18]. Joulovy ztráty dosahují, podle výkonu stroje, 1,6 % – 8 % z celkového výkonu stroje [28]. Přeměněná elektrická energie na teplo je určena Joulovým zákonem [4], [5].

$$Q = R \int_0^t i^2 dt, \quad (4.2)$$

kde  $Q$  [J] je množství tepla,  $R$  [ $\Omega$ ] odpor vodiče,  $i$  [A] okamžitá hodnota proudu a  $t$  [s] doba průchodu proudu.

Joulovy ztráty ve vinutí se určují vztahem [3], [4], [5], [15], [31], [32]:

$$\Delta P_{Cu} = R \cdot I_{ef}^2, \quad (4.3)$$

kde  $\Delta P_{Cu}$  [W] jsou Joulovy ztráty ve vinutí,  $R$  [ $\Omega$ ] je odpor vodiče a  $I_{ef}$  [A] je efektivní hodnota proudu. Efektivní hodnotu proudu lze určit ze vztahu [3], [4], [5], [31], [32]:

$$I_{ef} = \sigma \cdot S, \quad (4.4)$$

kde  $I_{ef}$  [A] je efektivní hodnota proudu,  $\sigma$  [A/m<sup>2</sup>] je proudová hustota a  $S$  [m<sup>2</sup>] průřez vodiče.

#### 4.1.2 Ztráty v železe

Magnetický obvod asynchronního stroje je složen z tenkých plechů. Když prochází tímto obvodem střídavý tok, tak v železe vznikají ztráty. Ztráty jsou způsobené natáčením

magnetických dipólů uvnitř použitého materiálu a přeměňují se na teplo [2], [30]. Velikost těchto ztrát se udává ztrátovým číslem. Je-li materiál s malým ztrátovým číslem, tak jeho mechanická pevnost je také malá. Má-li materiál velké ztrátové číslo, je jeho mechanická pevnost velká. Velikost ztrát v železe je obvykle 1 % – 3 % jmenovitého výkonu stroje [2].

Ztráty v železe se dále dělí na ztráty hysterezní, ztráty vířivými proudy a ztráty přídavné.

#### 4.1.2.1 Ztráty hysterezní

Ztráty hysterezní vznikají při magnetizaci feromagnetika, jako důsledek magnetické hystereze. Jejich velikost závisí na ploše hysterezní smyčky, kvadrátu magnetické indukce a frekvenci. Hysterezní ztráty se určují podle vztahu [2], [4], [5], [15], [29], [30], [31]:

$$\Delta P_h = B^2 \cdot f, \quad (4.5)$$

kde  $\Delta P_h$  [W] jsou ztráty hysterezní v železe,  $B^2$  [T] velikost magnetické indukce a  $f$  [Hz] kmitočet magnetování.

#### 4.1.2.2 Ztráty vířivými proudy

Ztráty vířivými proudy ve stroji vznikají kvůli elektrické vodivosti feromagnetických materiálů využitých v magnetických obvodech. Způsobuje je indukování napětí v těchto materiálech. Dají se omezovat zvýšením elektrického odporu materiálu, k čemuž se využívá křemíku. Křemík se ovšem do plechů magnetického obvodu nemůže přidávat ve velkém množství, protože materiál se se zvyšováním křemíku stává křehčím a plechy se mohou lámat. Ztráty vířivými proudy se dají omezit i zmenšením průřezu plechů. Vířivé ztráty se dají vyjádřit vztahem [2], [4], [5], [28], [29], [30]:

$$\Delta P_v = \frac{U_{ef}^2}{R_v}, \quad (4.6)$$

kde  $\Delta P_v$  [W] jsou ztráty vířivými proudy v železe,  $U_{ef}$  [V] efektivní hodnota indukovaného napětí a  $R_v$  [ $\Omega$ ] elektrický odpor materiálu.

### 4.1.2.3 Ztráty přídatné

Tyto ztráty jsou zaváděny při výpočtech a měření jednotlivých ztrát. Jsou vyvolány rozptylovými magnetickými toky a toky vyšších harmonických [32], [33].

### 4.1.3 Mechanické ztráty

Ztráty mechanické vznikají např.: třením v ložiskách, třením točících částí o vzduch nebo na ventilátoru. Ventilační ztráty vznikají ve všech částech stroje, které mají vlastnosti ventilátoru (žebra, ramena). Ztráty třením jsou závislé především na otáčkách stroje. Ventilační ztráty závisejí na třetí mocnině otáček [4], [5], [15], [34].

## 4.2 Způsoby šíření tepla

Všechny ztráty vzniklé v elektrickém stroji se mění na teplo a to je nutné odvádět efektivně ze stroje pryč. Teplo vzniklé ve stroji přechází z teplejšího prostředí (zdroje tepla) do chladnějšího prostředí a je označováno v čase jako tepelný tok. Předává se třemi různými způsoby a to sáláním (radiací), vedením (kondukcí) nebo prouděním (konvekci) [3], [5], [15].

### 4.2.1 Sálání

Sálání tepla se označuje také jako radiace, nebo záření. Při tomto způsobu předávání tepla dochází k přeměně částečné energie tepla na záření, které se šíří dále do okolí. Popis tepelného proudu sálání udává Stefan-Boltzmannův zákon [5].

$$P_S = SA(\theta_t^4 - \theta_o^4), \quad (4.7)$$

$$A = c_s 5,7 \cdot 10^{-8} \quad (4.8)$$

Kde  $\theta_t$  [°C] je absolutní teplota sálajícího tělesa,  $\theta_o$  absolutní teplota okolí, A činitel sálání absolutně černého tělesa a  $c_s$  je relativní sálání.

### 4.2.2 Vedení

Vedením je označováno sdílení tepla, při kterém přechází teplo z teplejšího povrchu na chladnější místo. Teplo se vedením odvádí nejčastěji vzduchem z povrchu a to velmi málo,

protože je vzduch špatným tepelným vodičem [5]. Tepelný tok, při kterém probíhá sdílení tepla, se určuje dle vzorce [15].

$$\Delta P = \frac{\Delta \vartheta A_b \lambda}{l}, \quad (4.9)$$

Když se tepelný tok vede ze zdroje tepla do okolí, vznikají při tom teplotní spády, které se dají omezit vybráním materiálu s co největší tepelnou vodivostí. Průchod tepelného toku by měl být zrealizován co nejkratší cestou a pokud prochází přes izolaci, měla by být tloušťka izolace co nejmenší, jelikož izolace klade tepelný odpor. Teplotní spád se vypočítá z rovnice [15], [35]:

$$\Delta \vartheta = \Delta P R = \frac{\Delta P l}{A \lambda}, \quad (4.10)$$

### 4.2.3 Proudění

Proudění je způsob sdílení tepla díky plynnému nebo kapalnému médiu. Je způsobeno přirozeným vztlakem, kdy s narůstající teplotou povrchu roste i rychlost proudění. Proudění se měří i počítá společně s vedením, tudíž jsou tyto dva způsoby od sebe neoddělitelné. Odvod tepla se provádí prouděním chladiva, které se nuceným prouděním pohybuje rychlostí, při které je schopno se ohřát od povrchu a teplo odvést pryč [5], [15].

## 5 Návrh výpočtu oteplení statorového svazku a vinutí

Výpočet oteplení statorového svazku a vinutí navazuje na výpočet ventilační, z kterého uvažuje velikost průtoku chladiva a jeho rozdělení ve stroji. Výpočet oteplení statorového svazku se provádí především pro zjištění středního a maximálního oteplení stroje.

### 5.1 Návrh výpočtu oteplení statorového vinutí

Ve vodičích, ze kterých se skládá vinutí, vznikají ztráty (teplo). Vodiče se chovají jako těleso s vnitřním zdrojem tepla a za určitý čas se v nich vytvoří teplo, které odpovídá ztrátám  $q$  [ $\text{W.m}^3$ ] [15], [35].

$$q = \sigma^2 \rho, \quad (5.1)$$

kde  $\sigma$  [ $A \cdot m^{-2}$ ] je hustota proudu a  $\rho$  [ $\Omega \cdot m$ ] je měrný odpor vodiče při střední teplotě. V průběhu výpočtu se položí bod  $x_0$  do poloviny délky vodiče mezi čely vinutí stroje a v tomto bodě  $x_0$  je podélný tepelný tok roven nule. Jakmile roste vzdálenost od bodu  $x_0$ , roste i lineárně hodnota tepelného toku [15], [35].

$$\omega = \frac{qAx}{x} = qx, \quad (5.2)$$

kde  $A$  [ $m^2$ ] je konstantní průřez,  $l$  [ $m$ ] je polovina délky vodiče v drážce statoru mezi čely vinutí,  $q$  [ $W \cdot m^3$ ] jsou ztráty vzniklé v části vinutí a  $x$  [ $m$ ] je vzdálenost od poloviny délky vodiče v drážce statoru mezi čely vinutí. V bodě  $x$  dochází ke spádu teploty, který je úměrný velikosti tepelného toku stroje [15].

$$qx = -\lambda \frac{d\Delta\vartheta}{dx}, \quad (5.3)$$

kde  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti materiálu. Integrováním této rovnice se zjistí oteplení. Před samotnou integrací se převádí činitel úměrnosti na druhou stranu rovnice [15], [35].

$$\Delta\vartheta_{(x)} = \frac{q}{2\lambda} x^2 + C \quad (5.4)$$

Průřez oteplení je parabolický [15].

$$\Delta\vartheta_{(x)} = \frac{q}{2\lambda} (l^2 - x^2) \quad (5.5)$$

Vnitřní oteplení je největší v bodě  $x_0$  [15].

$$\Delta\vartheta_{(x)} = \frac{q}{2\lambda} \quad (5.6)$$

Při výpočtu oteplení statorového vinutí se musí brát v úvahu počet vodičů.



## 5.2 Návrh výpočtu oteplení statorového svazku

Ve statorovém svazku je přítomen křemík a na jeho množství ve statorových plechách je závislá tepelná vodivost. Mezi jednotlivými izolovanými plechy vzniká výrazný tepelný odpor. Tento odpor mezi plechy nelze přesně určit, je závislý na mnoha faktorech, jako například na velikosti nanesené izolace, slisování atd. [15], [35].

Ze svazku plechů statoru se teplo odvádí plochou na čelech statoru. Statorový svazek je chlazený vzduchem ze stran. Výpočet oteplení statorového svazku je v podstatě stejný jako výpočet pro oteplení statorového vinutí, jen  $q$  je zastoupeno vzniklými ztrátami v objemové jednotce [3], [15], [35].

$$\Delta P_{Fe} = p_{1,0} \cdot k_p \cdot G \cdot B^n \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3}, \quad (5.7)$$

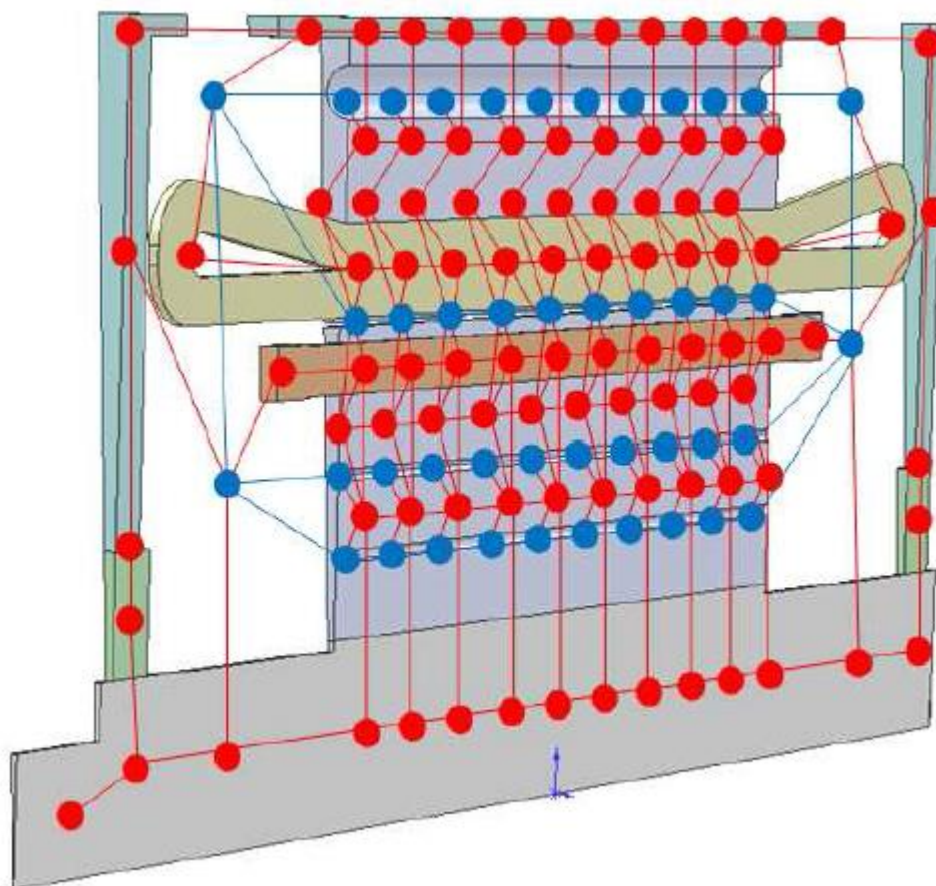
kde  $\Delta P_{Fe}$  [W] jsou ztráty v železe, ztráty hysterezní a ztráty vířivé,  $p_{1,0}$  [W.kg<sup>-1</sup>] jsou měrné ztráty elektrotechnické oceli,  $G$  [kg] je hmotnost částí,  $k_p$  [-] je činitel, který respektuje zvětšení ztrát vyšší harmonickou a změnou struktury elektrotechnické oceli při výrobě,  $B$  [T] je amplituda sinusově se měnící indukce v části, kde se ztráty určují,  $n = 5.69 \log \frac{p_{1,5}}{p_{1,0}}$ ,  $p_{1,5}$  jsou měrné ztráty při  $B = 1,5$  T a  $f = 50$  Hz [W.kg<sup>-1</sup>] a  $f$  [Hz] je frekvence [3], [5], [15], [35].

## 6 Konfrontace analytického tepelného návrhu elektrického točivého stroje sestaveného na základě náhradní tepelné sítě s výsledky analýzy metodou konečných prvků a měření

Jak již bylo napsáno v kap. 5, tepelný výpočet bezprostředně navazuje na výpočet ventilační. V této kapitole budou popsány metody tepelných analýz elektrických strojů. Následně budou tyto metody porovnány. Hodnoty a výsledky vycházejí z práce [36].

## 6.1 Tepelný návrh založený na základě náhradní tepelné sítě

Metoda tepelné analýzy stroje, která vychází z určení střední hodnoty trojrozměrného tělesa [27]. Tepelná síť je v podstatě soustava prvků. Stroj se rozdělí na menší části, které usnadňují řešení výpočtu. Vazba na další části stroje, nebo na okolí je zajištěna okrajovými podmínkami. Elektrický stroj je v této metodě nahrazen soustavou těles, které odpovídají jednotlivým částem stroje, jež jsou mezi sebou propojeny. Soustava je vlastně model cest tepelných toků strojem. V tepelné síti jsou odpory zástupci zdrojů (ztrát) tepla ve stroji. Tepelná síť je složena ze zdrojů, uzlů, větví a místa odvodu tepla do chladiva nebo do vnějšího okolí. Všechny tyto prvky jsou charakterizovány svým středním oteplením, k tomu zdroje navíc ještě velikostí svých ztrát a každá větev hodnotou svého tepelného výkonu. Kvůli přesnosti je důležité rozčlenění elektrického stroje na jednotlivé části. Každý jednotlivý prvek tepelné sítě je definován rozměry z konstrukce stroje, střední teplotou (v uzlu daného prvku), tepelnou kapacitou prvku, ekvivalentními tepelnými vodivostmi a ztrátami, které v prvku mohou vzniknout. Výpočet jednotlivých tepelných odporů sítě je velmi složitý a proto se musí alespoň částečně zjednodušit. Zjednodušování se provádí



Obr. 6.1 Tepelná síť převzato [36].

pomocí všeobecně známých pravidel o zjednodušování elektrických obvodů [37], [36].

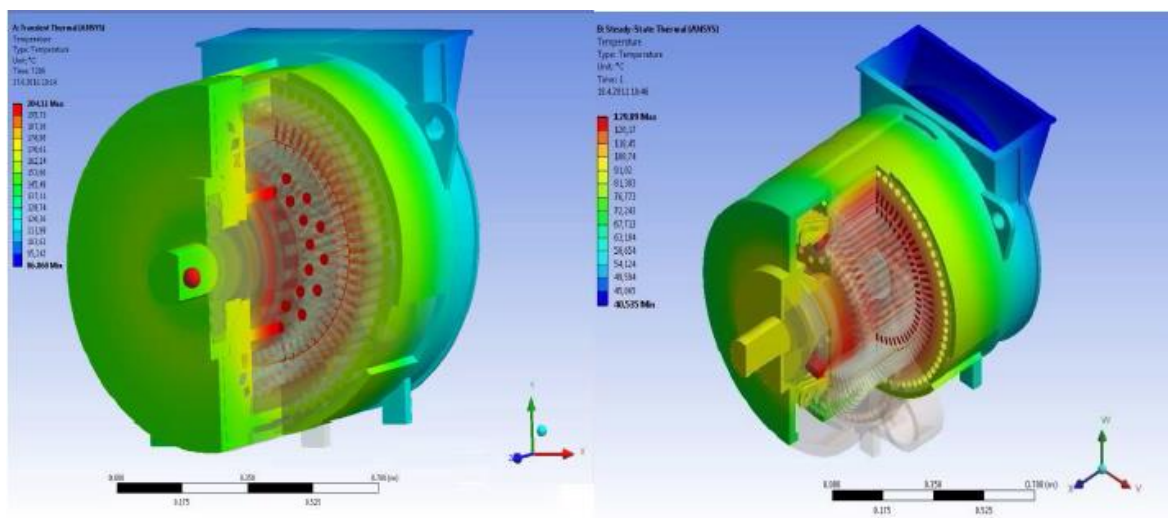
Výsledkem této tepelné analýzy je ustálené oteplení jednotlivých částí stroje, výpočet oteplovací a ochlazovací charakteristiky a stanovení rozdílů teplot v jednotlivých čtvrtinách po obvodu stroje.

## 6.2 Měření

Měření se provádí pomocí odporových teplotních čidel [36]. Výsledkem měření bývají například oteplovací charakteristiky stroje pouze pro ustálené hodnoty stroje, střední teplota vinutí, teploty ložiskových štítů a teplota vzduchu na výstupu ze stroje.

## 6.3 Analýza metodou konečných prvků

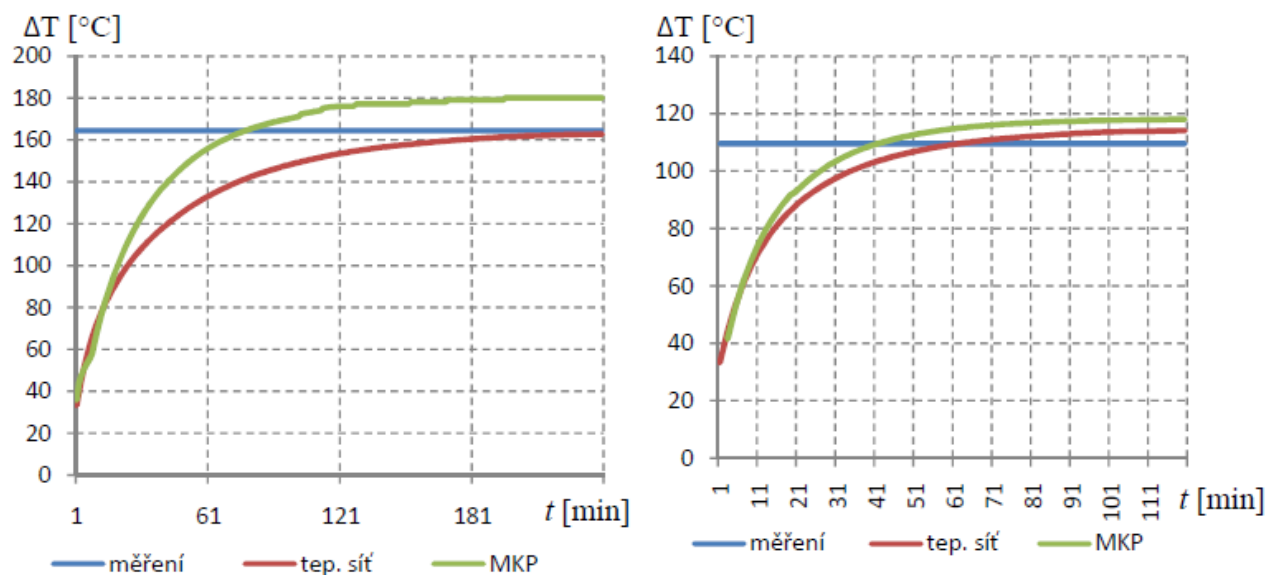
Metoda konečných prvků je jedna z novějších tepelných analýz, ale při jejím aplikování je nutné zjednodušení analyzované oblasti, a proto je potřeba získané výsledky dále porovnat s měřením nebo s analytickými výsledky [36]. Toto modelování elektrického stroje dovoluje stanovení rozložení oteplení a tepelných toků v jednotlivých částech stroje. Dále je možnost detailnějšího zjištění rozložení teplot v nejvíce oteplených místech.



Obr. 6.2 Namodelování stroje metodou konečných prvků převzato z [36].

Na obrázku 6.3 jsou znázorněny a porovnány výsledky MKP, metody tepelné sítě a měřením. Prezentované výsledky jsou pro různá průtočná množství chladiva  $Q$  [ $m^3 s^{-1}$ ]

[36].



Obr. 6.3 Porovnání tepelných analýz elektrického stroje s měřením. Vlevo pro  $Q = 0,66 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , vpravo pro  $Q = 1,45 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Převzato z [36].

## Závěr

Zadáním této bakalářské práce bylo zabývat se šířením tepla v asynchronním stroji. Na začátku práce, byly popsány jednotlivé elektrické stroje, pro pochopení základních principů elektrických strojů točivých. V následující kapitole byly rozebrány jednotlivé podsystémy asynchronního stroje, aby bylo přiblíženo, z jakých komponent je stroj složen a jakou určitou roli tyto komponenty ve stroji splňují.

Další kapitolou, byly izolační systémy asynchronních strojů a technologie, které se pro výrobu používají. Kvůli popsání izolačního systému, byly v úvodu kapitoly popsány základní vlastnosti izolantů a jejich charakteristiky. Dále je kapitola zaměřena na současně používané kompozitní materiály, jejich složení a důvod využívání zrovna těchto materiálů jako elektroizolaci točivých strojů. Technologie pro výrobu izolačních systémů u vysokonapěťových strojů jsou vakuově tlaková impregnace a resin rich. U těchto technologií je popsán postup při výrobě a použité materiály. Technologie spolehlivější i více využívaná je vakuově tlaková impregnace, ovšem je to i technologie dražší. V poslední části této kapitoly je popsána možnost využití nano plniv. Použití nano plniv je stále zkoumáno a vědci dochází k velmi zajímavým poznatkům při využití těchto nano materiálů, např. snížení prostorového náboje, nebo zvýšení tepelné vodivosti izolace. Bude-li vyvinut elektroizolační materiál s vyšší hodnotou součinitele tepelné vodivosti, ztráty budou odváděny lépe, případně můžeme stroj zatížit vyšší hodnotou proudu, což může vést k lepšímu využití elektrického stroje.

V následující kapitole jsou popsány ztráty, které vznikají ve stroji. Je popsáno, kde vznikají a z jakého důvodu ke ztrátám dochází. Následně je popsáno, jakým způsobem se ztráty v podobě tepla strojem šíří. Dále je navrhnout výpočet na oteplení statorového svazku a vinutí, který navazuje na výpočet ventilační a používá se především pro výpočet středního a maximálního oteplení stroje.

V kapitole konfrontace analytického tepelného návrhu elektrického točivého stroje sestaveného na základě náhradní tepelné sítě s výsledky analýzy metodou konečných prvků a měření jsou tyto metody přiblíženy a za využití hodnot z práce [36] porovnány mezi sebou a mezi měřením tepla na jednotlivých částích stroje.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MĚŘIČKA Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK. *Elektrické stroje*. Vyd.2. Praha: ČVUT, Elektrotechnická fakulta, 1993. ISBN 80-01-02109-2.
- [2] KONEČNÁ, E., RICHTER, A., Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií, Katedra elektrotechniky a elektromechanických systémů., *Elektrické stroje*, Učební texty, Upravené vydání září 2000, [online], [cit. 2015-12-10], dostupné z: [http://www.spse.dobruska.cz/download2/El\\_Str1\\_h.pdf](http://www.spse.dobruska.cz/download2/El_Str1_h.pdf).
- [3] PETROV, G. N., *Elektrické stroje 2*, Asynchronní stroje – Synchronní stroje, Academia Praha, Czech Translation 1982.
- [4] KOPYLOV, I. P., *Stavba elektrických strojů*. Praha, SNTL, 1988.
- [5] CIGÁNEK, L., *Stavba elektrických strojů*. Praha, SNTL, 1958.
- [6] KOČMAN, Stanislav a Ctirad KOUDELKA. *Asynchronní stroje* [online]. Ostrava, 2004 [cit. 2015-12-17]. Dostupné z: <http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske/prednasky/Asynchronni%20stroje-FAST.pdf>. VŠB – TU Ostrava.
- [7] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2001. ISBN 80-7078-857-7.
- [8] STÝSKALA, Vítězslav a Jan DUDEK. *Elektrické stroje úvod – asynchronní motory* [online]. Ostrava, 2007 [cit. 2015-12-26]. Dostupné z: [http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske\\_FS/prednasky/1\\_AM\\_FS.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/1_AM_FS.pdf)
- [9] *Asynchronní stroje* [online]. [cit. 2015-12-26]. Dostupné z: <http://www.spse.dobruska.cz/download/sokol/AM.pdf>
- [10] *Synchronní stroje* [online]. [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: <http://fei1.vsb.cz/kat430/old/Studium/Materialy/VS/kap24.pdf>
- [11] NAVRÁTILOVÁ Eva. *Elektrické stroje*. Havířov, 2011. Učební texty. SŠ Havířov.
- [12] Stejnoseměrné stroje [online]. [cit. 2016-01-07]. Dostupné z: <http://www.spse.dobruska.cz/download/sokol/ss.pdf>
- [13] KOČMAN, Stanislav. *Stejnoseměrné stroje* [online]. Ostrava, 2002 [cit. 2016-01-31]. Dostupné z: [http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/jess\\_zaloha/stejnosemerne%20stroje.pdf](http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/jess_zaloha/stejnosemerne%20stroje.pdf)
- [14] Jak se dělá elektromotor. *ELEKTRO* [online]. 2011, **2011**(2), 36-43 [cit. 2016-01-31]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/jak-se-dela-elektromotor--9725>
- [15] WIEDEMANN, E., KELLENBERGER, W., *Konstrukce elektrických strojů*, Praha, SNTL, 1973.
- [16] T. Tomášková, teze disertační práce: *Zlepšování tepelné bilance elektrických strojů*, školitel: Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D., ZČU Plzeň 2014, nepublikováno
- [17] *Asynchronní (indukční) stroje (motory)* [online]. [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: [http://www.pslib.cz/pe/skola/studijni\\_materialy/motory/indukcni\\_motor/asynchr\\_motor\\_teorie.pdf](http://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/motory/indukcni_motor/asynchr_motor_teorie.pdf)
- [18] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN – technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-7300-189-6
- [19] ŠAVEL, Josef. *Elektrotechnologie: materiály, technologie a výroba v elektronice a elektrotechnice*. 4., rozš. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-190-X

- [20] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN – technická literatura, 2008, 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9
- [21] TUREK, Miroslav. *Točivé stroje a jejich izolační systémy*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ondřej Krpal
- [22] ROSICKÝ, Jiří. *Úvod do problematiky kompozitních materiálů* [online]. Brno, 1999 [cit. 2016-05-31]. Dostupné z: <http://www.ortotikaprotetika.cz/oldweb/Wc4a791405f74c.htm>
- [23] ŽIVNÝ, Petr. *Izolační systém resin rich pro vinutí generátorů*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Josef Pihera.
- [24] TOMÁŠKOVÁ, Tetjana, Michal SVOBODA a Pavel TRNKA. *Vliv nano- a mikroplniv na šíření tepla elektroizolačními systémy*. Plzeň, 2013. Západočeská univerzita v Plzni.
- [25] R. Polanský, M. Bartůňková, P. Prosr, J. Pihera, J. Chvojka, A study on the usage of nonwoven nanofibers in electrical insulating materials, 978-1-4673-7498-9/15/\$31.00 @2015 IEEE 2015 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena
- [26] Lukáš Harvánek, Tetjana Tomášková, Michal Svoboda, Václav Mentlík, Composites with Nanosilica, ISBN: 978-1-4799-8903-4 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM, Austrálie)
- [27] LIST, Vlastimil, HAK, Josef a kol., a. *Elektrotechnika II - elektrické stroje, část 1*. Praha: SNTL, 1969.
- [28] Janda, M., Doktorská práce, *Teplotní optimalizace elektrických strojů*, VUT v Brně, 2008, Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Hana Kuchynková, [online], [cit. 2016-03-21], dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/12781/DIS-janda.pdf?sequence=1>.
- [29] Trnka, Z., *Výpočet průběhu chladicího média v asynchronním motoru.*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. 2011. 59s., vedoucí Ing. Marcel Janda Ph.D., [online], [cit. 2016-04-04] dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=38945](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38945)
- [30] Pavelková, N., produktový manažer ABB s. r. o., Účinnost elektrických motorů a snižování spotřeby elektrické energie, [online], [cit. 2016-04-04] dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=37850](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37850).
- [31] Kučerová, E., *Elektrotechnické materiály*, ZČU, Plzeň 2002, ISBN 80-7082-940-0.
- [32] Kůs V., Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu, BEN technická literatura, Praha 2002, 1. Vydání ISBN 80-7300-062-8.
- [33] Kůs V., Napět'ové namáhání vinutí asynchronních motorů při napájení z měničů kmitočtu., Sborník konference Diagnostika 1997, Plzeň, str. 137 – 141.
- [34] Rok, M., Aspekty oprav čel vinutí velkých točivých elektrických strojů, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Václav Mentlík, CSc., 2012.
- [35] SYNEK, Petr. *Šíření tepla v synchronním stroji*. Plzeň, 2015. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Tetjana Tomášková.
- [36] PECHÁNEK, Roman. *Ventilační a tepelná analýza trakčního asynchronního motoru*. Plzeň, 2011. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Josef Červený.
- [37] VLACH, Radek. *Tepelné procesy v mechatronických soustavách*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-3976-4.

## **Přílohy**