

Fakulta elektrotechnická  
Katedra výkonové elektroniky a strojů

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vývoj a výroba nových ložiskových štítů pro vytipované elektrické stroje, určené pro připojení vodního nebo olejového chlazení

Autor práce: **Bc. Jiří Holý**  
Vedoucí práce: **Ing. Lukáš Veg, Ph.D.**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2023/2024

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří HOLÝ**  
Osobní číslo: **E21N0030P**  
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**  
Specializace: **Elektrické stroje**  
Téma práce: **Vývoj a výroba nových ložiskových štítů pro vytípané elektrické stroje, určené pro připojení vodního nebo olejového chlazení**  
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

## Zásady pro vypracování

V rámci vypracování diplomové práce bude vytípan elektrický stroj, uvažena změna jeho konstrukce na kapalinové chlazení (spray-cooling) a tato změna provedena.

1. Proveďte lokalizaci vznikajících tepelných ztrát a určete jejich velikost.
2. Navrhněte úpravu ložiskových štítů a přizpůsobte kapalinové chlazení jejich konstrukci.
3. Proveďte měření elektrického stroje před a po úpravě.
4. Proveďte porovnání a vyčíslete zlepšení chladicích poměrů.
5. Diskutujte problémy, výhody a nevýhody nové konstrukce.

Rozsah diplomové práce: **40-60**  
Rozsah grafických prací: **2**  
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ: Design of Rotating Electrical Machines. Second Edition. United Kingdom: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-58157-5.
2. KOPYLOV I.P. a kol.: Stavba elektrických strojů, SNTL, Praha, 1988.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lukáš Veg, Ph.D.**  
Research and Innovation Centre for Electrical  
Engineering

Datum zadání diplomové práce: **6. října 2023**  
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**



L.S.

**Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.**  
děkan



**Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 6. října 2023

## **Abstrakt**

Tato práce se zaměřuje na úpravu asynchronního stroje o výkonu 4 kW z klasického chlazení ventilátorem na hřídeli na chlazení pomocí metody spray cooling. Tato problematika zahrnovala vytvoření ústrojí pro rozvod a chlazení chladicí kapaliny, vytvoření ložiskových labyrintů pro jejich ochranu, určení umístění a vyvrtání děr pro trysky a také finální otestování stroje. Výsledkem bylo snížení teploty vinutí až o 24,72 °C. Při testování na frekvenčním měniči došlo k poškození stroje a není možné jej nadále provozovat. Byly také navrženy možnosti dalšího výzkumu v oblasti chlazení metodou spray cooling.

## **Klíčová slova**

spray cooling, asynchronní stroj, labyrint, teplota, chlazení, chladicí kapaliny, trysky, tepelné ztráty

## **Abstract**

This thesis focuses on the modification of a 4 kW asynchronous machine from conventional fan-on-shaft cooling to spray cooling. This included the creation of the coolant distribution and cooling system, the creation of bearing labyrinths for their protection, the determination of the location and drilling of the holes for the nozzles and also the final testing of the machine. The result was a reduction in winding temperature of up to 24.72°C. During testing on the frequency converter, the machine was damaged and can no longer be operated. Further research into spray cooling was also suggested.

## **Key Words**

spray cooling, asynchronous machine, bearing labyrinths, temperature, cooling, coolants, nozzles, heat losses

### **Poděkování**

Chtěl bych tímto způsobem poděkovat katedře výkonové elektroniky a strojů za propůjčení místa a vybavení pro potřebná měření. Dále bych chtěl poděkovat za přístup a možnost využití Makerspace, kde bylo veškeré potřebné vybavení pro úpravu stroje. Nakonec bych rád poděkoval Ing. Lukáši Vegovi Ph.D. za vedení závěrečné práce.

# Obsah

Úvod .....	- 1 -
1 Teoretický základ .....	- 2 -
1.1 Tepelné ztráty .....	- 2 -
1.1.1 Ohmovy ztráty ve vinutí .....	- 2 -
1.1.2 Ztráty v železe .....	- 3 -
1.1.3 Mechanické ztráty .....	- 3 -
1.1.4 Přídavné ztráty .....	- 3 -
1.2 Druhy přestupu tepla .....	- 4 -
1.2.1 Kondukce .....	- 4 -
1.2.2 Konvekce .....	- 5 -
1.2.3 Radiace .....	- 5 -
1.3 Běžně používané způsoby chlazení průmyslových motorů .....	- 6 -
1.3.1 Otevřené provedení s aktivním nebo pasivním chlazením vzduchem .....	- 6 -
1.3.2 Uzavřené provedení s aktivním nebo pasivním chlazením vzduchem .....	- 7 -
1.3.3 Uzavřené provedení s aktivním chlazením kapalinou .....	- 7 -
1.3.4 Další způsoby chlazení elektrických průmyslových strojů .....	- 8 -
1.4 Modernější způsoby chlazení motorů zaměřených převážně na trakci .....	- 8 -
1.4.1 Podrobnější varianty moderního chlazení kapalinou elektrických motorů .....	- 8 -
1.4.2 Příklady aplikací moderních způsobů chlazení .....	- 12 -
1.5 Spray cooling .....	- 13 -
1.5.1 Chladící médium .....	- 14 -
1.5.2 Trysky .....	- 15 -
1.5.3 Vzor rozstříku .....	- 15 -
1.5.4 Pokrytí rozstříku .....	- 17 -
1.5.5 Velikost kapiček média .....	- 17 -
2 Lokalizace tepelných ztrát .....	- 19 -
2.1 Teorie měření nakrátko a naprázdno .....	- 19 -
2.2 Praktické měření a výsledky měření nakrátko a naprázdno .....	- 21 -
2.2.1 Měření naprázdno .....	- 21 -

2.3	Měření nakrátko.....	- 22 -
3	Konstrukční úprava asynchronního motoru a způsobu chlazení.....	- 24 -
3.1	Ústrojí pro chlazení a rozvod média.....	- 24 -
3.2	Změna na ložiskových štítech.....	- 28 -
3.3	Konstrukce labyrintu .....	- 29 -
3.4	Finální úpravy na motoru .....	- 31 -
4	Postupy měření .....	- 33 -
4.1	Měření na sucho zjišťovací.....	- 34 -
4.2	Měření se spray cooling testovací .....	- 34 -
4.3	Měření se spraycooling s frekvenčním měničem .....	- 35 -
5	Porovnání výsledků .....	- 36 -
5.1	Porovnání prvního a druhého měření .....	- 36 -
5.2	Výsledky třetího měření .....	- 38 -
6	Diskuse .....	- 39 -
7	Zhodnocení a závěr.....	- 40 -
8	Literatura .....	- 41 -



## Seznam symbolů a zkratek

Značka	Popis	Jednotka
$\varepsilon$	Emisivita	[-]
$\lambda$	Měrná tepelná vodivost	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
$\partial\vartheta$	Rozdíl teplot	[K]
$\partial x$	Rozdíl vzdáleností	[m]
$\alpha_{\text{konv}}$	Součinitel přestupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
$\sigma_{\text{SB}}$	Stefan-Boltzmannova konstanta	[-]
$q_{\text{kond}}$	Hustota tepelného toku kondukcí	$[W/m^2]$
$q_{\text{konv}}$	Hustota tepelného toku konvekcí	$[W/m^2]$
$q_{\text{rad}}$	Hustota tepelného toku radiací	$[W/m^2]$
$\alpha$	Teplotní součinitel odporu	$[K^{-1}]$
NDE	Část motoru bez hřídele pro pohon	
DE	Část motoru s vytaženou hřídelí pro pohon	
Hot spot	Oblast s největší teplotou oproti okolí	

## Úvod

V posledních letech dochází k postupnému uvědomování si problematiky globálního oteplování a ekologie ve společnosti. V průmyslu je stále větší snaha o snížení emisí skleníkových plynů a spotřebu neobnovitelných zdrojů. Toto se také velmi dotýká běžného života lidí. Nejvíce v postupném přechodu z aut se spalovacím motorem na automobily s elektrickým pohonem.[1] Na elektrické motory pro automobilový průmysl jsou kladeny různé nároky. Mezi nimi je také vyšší hustota výkonu. S tím je přímo spojena proudová hustota vinutí, a tedy i jeho oteplení.

Běžné způsoby chlazení vzduchem bohužel nedokáží uchládit stroj s dostatečně velkou hustotou výkonu pro moderní vozidla. Proto jsou intenzivně zkoumány jiné, modernější, varianty.[2] Mezi ně patří přímé (spray cooling) a nepřímé (kanály v kostře stroje nebo v duté hřídeli) způsoby chlazení médiiem.

Spray cooling je jednou z těchto metod, která je hojně zkoumána teoreticky [3][4] a v poslední době i prakticky.[5][6] Tato práce je primárně zaměřena na úpravu chlazení asynchronního stroje pro metodu spray cooling a následné zjištění jeho chování pod vlivem jiného typu chlazení. Bylo zjišťováno, jestli a jak bude efektivní spray cooling, schopnost stroje provozu na sinusovém a nesinusovém napájení a také možnost jeho přetížení. Za tímto cílem bylo postaveno chladicí ústrojí a vytvořeny ochranné prvky pro ložiska stroje.

# 1 Teoretický základ

## 1.1 Tepelné ztráty

Elektrické stroje mají své vlastní jedinečné charakteristiky a provozní požadavky. Mezi tyto požadavky patří i řešení tepelných ztrát, které jsou vedlejším produktem provozu těchto strojů. Tepelné ztráty jsou faktorem, který vzniká průtokem elektrického proudu vinutím, vlivů magnetického obvodu a dalších fyzikálních jevů, jež jsou spojeny s přeměnou elektrické energie na mechanickou.

Aby bylo možné efektivně řídit provoz a prodloužit životnost elektrických strojů, je nezbytné navrhnout, měřit a analyzovat tepelné ztráty, které tyto stroje generují. Přesné stanovení těchto ztrát poskytuje základ pro následné rozhodnutí o správném způsobu chlazení. Rozsáhlý tepelný výpočet se tak stává klíčovým krokem v optimalizaci energetické účinnosti a celkového výkonu elektrických strojů.

Tepelný výpočet zahrnuje důkladnou analýzu faktorů ovlivňujících tepelné ztráty, jako jsou proudy, napětí, frekvence a materiálové vlastnosti. Velmi velkou roli zde hrají moderní technologie včetně simulací a modelování, které mohou usnadnit a zpřesnit daný výpočet.

### 1.1.1 Ohmovy ztráty ve vinutí

Ohmovy ztráty jsou představovány jako základní prvek, který velmi ovlivňuje konečnou účinnost elektrického stroje. Zejména toto platí u strojů navrhovaných na vysokou hustotu výkonu. Tyto ztráty zároveň udávají tzv. Jouleovo ztrátové teplo. To vzniká při průchodu elektrického proudu skrze vinutí statoru a rotoru. [7]

$$P = R \cdot I^2 \quad (1.1)$$

Jedním z významných vlivů na odpor, a tedy i Jouleovy ztráty je teplota vinutí. Zapříčiňuje to rostoucí kinetickou energii částic v látce, které do sebe poté častěji naráží. Do těchto částic mohou narážet také samotné elektrony. To má za následek zvýšení odporu.

Vznikla materiálová konstanta teplotní součinitel odporu  $\alpha$ , který popisuje nárůst odporu při zvýšení teploty látky o 1 K. Pro výpočet odporu při dané teplotě se používá vzorec:

$$R_{\vartheta_2} = R_{\vartheta_1} \cdot (1 + \alpha \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)) \quad (1.2)$$

Pro měď vychází nárůst odporu o téměř 40 % při rozdílu teplot 100 K. Je tedy důležité důkladné zohlednění teplotních vlivů na odpor vinutí pro přesné odhadování celkových ztrát.

### **1.1.2 Ztráty v železe**

Ztráty v železe jsou řešeny ve statorových a rotorových pleších, pokud jimi prochází střídavý magnetický tok, který je vytvářen střídavým elektrickým polem. Přesněji lze říct, že ztráty v železe mají největší vliv ve statoru a rotoru asynchronního stroje, statoru synchronního stroje a rotoru stejnosměrného stroje.

Tyto ztráty jsou závislé na jejich tloušťce, přesném materiálovém složení a provozních podmínkách stroje. Jsou složeny ze tří typů ztrát – ztráty vířivými proudy, ztráty hysterezní a přídavné ztráty. Vířivé ztráty vznikají na základě proudu vytvářeným z indukovaného napětí v samotném železe. Z tohoto důvodu se konstrukční části použité pro střídavé magnetické toky dělají z elektrotechnických plechů, které snižují plochu průchozímu elektrickému proudu, a tedy zvyšují jejich odpor. Hysterezní ztráty jsou tvořeny opakovaným přemagnetováním železného materiálu. Jsou úměrné ploše hysterezní křivky z B-H charakteristiky.

Magnetické materiály mají nelineární charakteristiku a je komplikovanější s nimi analyticky počítat. Z toho důvodu se používají výpočetní systémy na bázi např. metody konečných prvků pro přesné výsledky. [7].

### **1.1.3 Mechanické ztráty**

Mechanické ztráty jsou obvykle způsobeny třením mezi různými pevnými komponenty, jako např. v ložiscích, kde se třou valivé elementy o pevně ukotvené části ložisek. Jsou závislé na rychlosti rotoru, použitém mazivu ložisek a točivém momentu. Obecně jsou vyšší při vysoké rychlosti rotoru, nedostatečné mazání a větší hrubosti povrchu. Mezi mechanické ztráty také patří ztráty třením rotoru o vzduch (nebo jiné médium).

### **1.1.4 Přídavné ztráty**

Přídavné ztráty jsou nezařazenou složkou ztrát vznikající ve stroji. Obecně platí, že rostou společně frekvencí napájecího proudu. V analytickém výpočtu se uvádí jako určité procento (např. 10 %) z celkových ztrát elektrického stroje. Samozřejmě záleží na typu konstrukce daného stroje.

## 1.2 Druhy přestupu tepla

Teplu, které vzniká v důsledku výše popsaných ztrát se musí odvést ze stroje pryč, aby nedocházelo ke zvýšení teploty izolace vinutí, která je na teplotu nejvíce náchylná z celého stroje. Odvod tepla se může realizovat mnoha způsoby, ale vždy se jedná o kombinaci tří základních fyzikálních principů pohybu tepla.

### 1.2.1 Kondukce

Prvním z fyzikálních principů přenosu tepla, je kondukce – vedení tepla. Tento princip se uplatňuje ve třech základních skupenstvích – pevné, kapalné, plynné. Jedná se o přestup tepla mimo makroskopický pohyb látek. Vše probíhá na velikosti molekul, které do sebe neustále naráží. Při každém nárazu dochází k předání kinetické energie jedné molekuly té druhé. Čím vyšší teplota, tím častější tyto nárazy jsou, protože je i vyšší kinetická energie molekul. Celkové teplo se přenáší z místa s vyšší teplotou a kinetickou energií do místa s nižší teplotou a kinetickou energií. Pro pevné, elektricky vodivé látky, je zde také energie volných elektronů.

Pro praktické výpočty existuje veličina měrná tepelná vodivost. Ta je materiálovou konstantou a popisuje chování dané látky v teplotním poli. Základní vzorec je Fourierův zákon pro přenos tepla vedením:

$$q_{kond} = -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \quad (1.3)$$

Kde  $\lambda$  ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ) je měrná tepelná vodivost. Ta udává schopnost materiálu vést teplo. Tato hodnota silně závisí na skupenství materiálu. Například v pevných látkách je vedení výraznější, což je patrné u materiálů jako stříbro, zlato a měď, jejichž hodnoty měrné tepelné vodivosti jsou v rozmezí 1–450  $W / (K \cdot m)$ . Oproti tomu plynné a kapalné látky mají měrnou tepelnou vodivost nižší ve většině případů.[8]

Tab. 1-1: Příklady součinitelů tepelné vodivosti  $\lambda$  [9]

Materiál	$\lambda$ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
Suchý vzduch	0,027
Vodík	0,18
Voda	0,6
Transformátorový olej	0,13-0,16
Měď	395

Elektrotechnické plechy (příčně)	1
Elektrotechnické plechy (podélně)	50-80

### 1.2.2 Konvekce

Přenos tepla konvekcí (prouděním) se objevuje ve dvou případech. Prvním z nich je varianta, kdy mezi sebou teplo předávají dvě tekutiny o jiné teplotě a dochází k vyrovnání jejich teploty. Druhý případ, který je pro chlazení elektrických strojů významnější, je v případě, kdy se tekutina dostává do kontaktu s plochou pevného tělesa. V tuto chvíli dochází k odvodu tepla z dané pevné látky, kterou může představovat např. kostra elektrického stroje. Tento druhý proces je popsán rovnicí:

$$q_{konv} = -\lambda \cdot grad T = \alpha_{konv} \cdot (T_{pov} - T_{tek}) \quad (1.4)$$

Největší problematikou je zde součinitel přestupu tepla  $\alpha_{konv}$ . Ten je nemožné přesně určit výpočty a je často prakticky určený měřeními pro dané aplikační podmínky. Obecně platí, že vyšší rychlost proudění tekutiny zvyšuje tento koeficient.

Tab. 1-2: Příklady součinitelů přestupu tepla  $\alpha$  [10]

Typ konvekce	Součinitel přestupu tepla $\alpha$ ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )
Vzduch, přirozená konvekce	2,5–25
Vzduch, nucená konvekce	10–500
Kapaliny, nucená konvekce	100–15000
Vroucí voda	2500–25000
Kondenzování vodní páry	5000–100000

Tabulka 1-2 výše vypisuje základní rozmezí součinitele přestupu tepla. Pro jeho přesnější výpočet se udávají speciální vzorce, které jsou vytvářené na základě znalostí předchozích měření. [9]

### 1.2.3 Radiace

Posledním z principů přestupu tepla je radiace – sálání. Tento princip se uplatňuje do určité míry na každé těleso o teplotě vyšší než 0 K. To je možné díky tomu, že se jedná o vyzařování elektromagnetického vlnění. To dokáže procházet i vakuem. Nejlepším přirozeným příkladem je sluneční záření, které předává veškerou energii na zemi jen díky radiaci.

Velikost sálání tepla z látky záleží na emisivitě. Čím vyšší emisivita, tím více záření těleso pohltí, ale také vyzáří. Roku 1879 byl objeven Stefan-Boltzmannův zákon, který popisuje velikost sálání na jednotku prostoru tělesem s emisivitou rovnou jedné.

$$e_b = \sigma_{SB} T^4 \quad (1.5)$$

$e_b$  je v tomto případě energie vyzářená ideálně černým tělesem na jednotku prostoru.  $\sigma_{SB}$  je Stefan-Boltzmannova konstanta, která se určovala experimentálně. Tepelný tok radiací pro jakýkoliv materiál lze určit jako:

$$q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma_{SB} T^4 \quad (1.6)$$

Kde  $\varepsilon$  je emisivita materiálu. Ta závisí na vlastnostech materiálu a lze ji experimentálně změřit nebo získat z jichž naměřených tabulek hodnot. [8]

### 1.3 Běžně používané způsoby chlazení průmyslových motorů

Existuje velmi mnoho způsobů, kterými je možné odvádět přebytečné teplo z elektrických strojů. Tyto metody se od sebe liší hlavně potřebnou konstrukcí chlazení, použitým chladivem a i místem, odkud se teplo primárně odvádí. Pro svoji jednoduchost a dostačující účinnost se používají určité typy chlazení více než jiné.

#### 1.3.1 Otevřené provedení s aktivním nebo pasivním chlazením vzduchem

Jedním z nejrozšířenějších typů chlazení elektrických strojů jsou stroje otevřené chlazené vzduchem aktivně anebo pasivně. Největší nevýhodou těchto strojů je možnost proniknutí pevných částic do elektrického stroje. To může způsobit snížení jejich účinnosti nebo dokonce vést k jejich destrukci.

- **Pasivně** chlazený stroj je nejjednodušší svojí konstrukcí. Na druhou stranu odvádí velmi málo ztrátového tepla, protože dochází jen k přirozené konvekci.
- Pro zlepšení těchto podmínek se přidává ventilátor, který může být umístěn na hřídeli stroje anebo může být externě připojený a napájený. Díky tomu dochází k nucenému oběhu vzduchu a vyšším koeficientům přestupu tepla. Rozdíl mezi přirozenou a nucenou konvekci lze vidět v tabulce 1-2. Kvůli nucené konvekci se tomuto způsobu říká **aktivní**.

Pro zlepšení odvodu tepla se do železných částí stroje dělají tzv. axiální nebo radiální kanály. Ty pomáhají k proudění vzduchu a zvyšuje se tím plocha, na které může docházet k přechodu tepla z pevné do tekuté látky.

### 1.3.2 Uzavřené provedení s aktivním nebo pasivním chlazením vzduchem

Dále existuje druhá velmi početná skupina strojů, které jsou chlazeny také vzduchem. V tomto případě ale nedochází ke vstupu chladiva do elektrického stroje. Díky tomu odpadá problematika nečistot. Nejčastěji se tento typ chlazení provádí s vlastním ventilátorem na vnější chlazení kostry stroje a popř. s výběžky na rotoru pro víření vzduchu uvnitř motoru.

- **Pasivní** varianta v tomto případě znamená, že teplo se ze stroje odvádí přirozenou konvekcí okolo vnější části kostry. Stejně jako v případě s otevřeným strojem, je tato varianta jednodušší, ale méně účinná.
- **Aktivní** varianta má dvě možnosti. Buďto se jedná o samobuzený oběh, kde je umístěn druhý ventilátor vně stroje na hřídeli. Není zde poté potřeba externího zařízení. Nevýhoda je, že se přidává další zátěž na samotný stroj. Druhou používanou možností je nucený oběh nezávislým tlakovým zdrojem.

### 1.3.3 Uzavřené provedení s aktivním chlazením kapalinou

Pro chlazení kapalinou se převážně bavíme o nuceném oběhu kapaliny pomocí čerpadla. Vniká zde komplikace v potřebě dobrého těsnění sekundárního okruhu a chlazení samotné kapaliny. Na rozdíl od vzduchu, který proudí do okolí, je kapalina nejčastěji ve svém uzavřeném okruhu, ze kterého bez přidání chladiče není jednoduché odevzdat teplo do okolí. Mohlo by tedy docházet k zahřátí chladící kapaliny na vysokou teplotu, což by vedlo k redukci chladících schopností.

Rozdíly v konstrukci se zde liší primárně v tom, jak je teplo předáváno ze stroje do kapaliny. Pravděpodobně nejčastěji používanou variantou je samobuzený oběh, kde ventilátor na hřídeli pomáhá předání tepla z vinutí, a ostatních zdrojů ztrát, do kostry, která je chlazená kapalinou.

Kapaliny používané pro chlazení jsou buďto oleje anebo deionizovaná voda. Oleje mají svoji nevýhodu oproti vodě:

- Vyšší tlakové ztráty, které vedou k nižší hodnotě koeficientu přestupu tepla
- Nižší tepelná kapacita oleje, která vede k vyšší teplotě v sekundárním oběhu
- Větší nákladnost, ekologická likvidace a nebezpečnost
- Hořlavost olejů



Oleje mají také jisté výhody:

- Velmi dobré elektroizolační vlastnosti
- Odolnost vůči nízkým teplotám a zamrznutí při venkovním provozu

V každém případě chlazení kapalinou má daleko vyšší účinnost, protože koeficient přestupu tepla je řádově vyšší než pro přirozeně nebo nuceně vzduchem chlazené stroje (Tab. 1-2). [11]

#### **1.3.4 Další způsoby chlazení elektrických průmyslových strojů**

Samozřejmě existuje více variant a možností pro chlazení elektrických strojů. Jsou to speciální případy, které nejsou tak běžně používány. Mezi ně patří např. chlazení velkých synchronních generátorů pomocí vodíku, další moderní způsoby chlazení nebo zde dále zkoumaný spray cooling.

### **1.4 Modernější způsoby chlazení motorů zaměřených převážně na trakci**

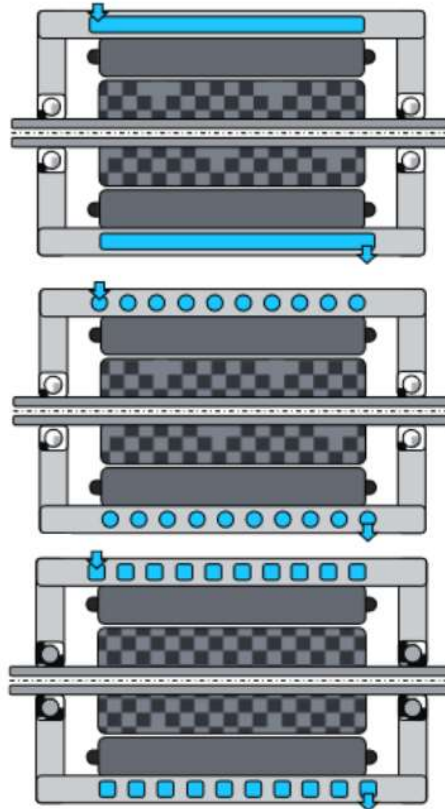
Na elektrické motory používané v trakci jsou kladeny daleko větší nároky z hlediska velikosti výkonu na objem, který mohou obsáhnout v daném vozidle. Tento parametr se nazývá hustota výkonu a je to jedna z nejčastěji řešených problematik pro moderní společnosti při výběru nebo návrhu elektrického motoru pro trakci.

Pro dosažení vyšší hustoty výkonu je potřeba navýšení proudů protékajících statorem, popř. rotorem motoru. To má za následek vyšší Jouleovy ztráty, které jsou na proud závislé kvadrátem. Tyto ztráty jsou poté přeměněny na teplo, které otepluje všechny části stroje. Pro izolaci vinutí je ale nemožné udržet teplotu vyšší, než je její tepelná třída.

Tento fakt vede k tomu, že je potřeba lepšího a efektivnějšího chlazení, než je tomu v klasických průmyslových případech. Proto se také více zkoumají a aplikují dříve nepoužívané a nepotřebné systémy chlazení.

#### **1.4.1 Podrobnější varianty moderního chlazení kapalinou elektrických motorů**

První z variant, která se i v praxi hojně používá je chlazení statoru pomocí vodních kanálů v kostře statoru.

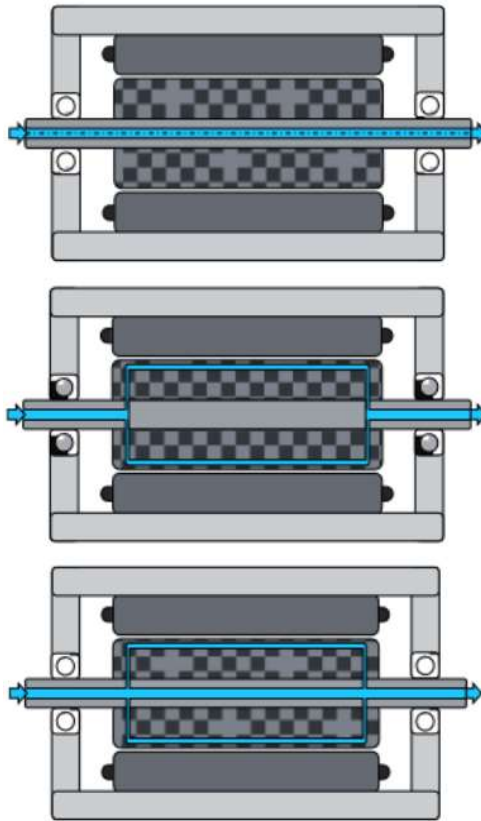


Obr. 1: Příklady vodních kanálů v kostře statoru [2]

Varianty v obrázku 1 se liší konstrukcí kanálu. Varianta nahoře zobrazuje axiální kanály. Další dvě varianty jsou zobrazením kanálu, který je ve spirále kolem celého stroje. Kanály mohou mít různé průřezy jako např. kruhovitý nebo téměř čtvercový.

Tento styl chlazení je primárně účinný při odvodu tepla ze statorového vinutí skrze jho a část kostry. Pokud se prodlouží kanály do části kostry nad vzduchem okolo čel, může navíc docházet k méně efektivnímu, ale stále pozitivnímu, chlazení zbytku stroje skrze vzduch jako médium. Tato varianta se může kombinovat s axiálními vzduchovými kanály ve statoru a rotoru společně s ventilátorem na rotoru. To napomůže lepší cirkulaci vzduchu, a tedy i lepšímu odvodu tepla do vodních kanálů v místě nad čely.

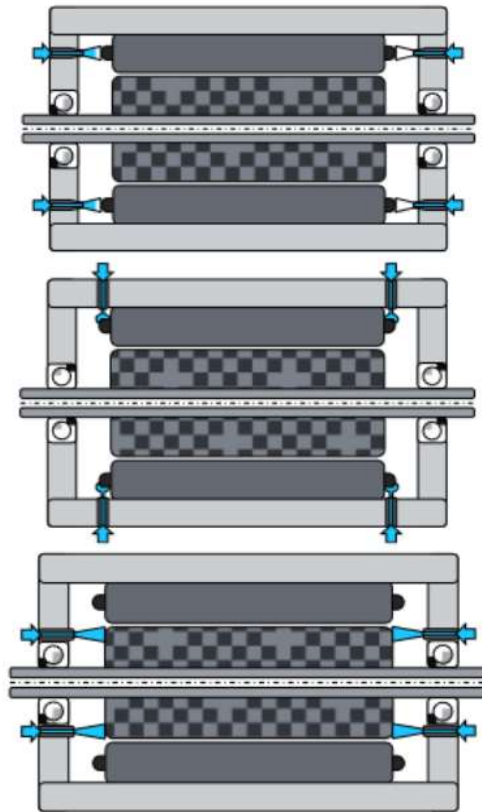
Další možností je chlazení rotoru pomocí vody nebo jiné chladicí kapaliny skrze hřídel stroje.



Obr. 2: Příklady vodního chlazení skrze hřídel [2]

V tomto případě dochází na rozdíl od kanálů v kostře k silnému odvodu tepla z rotoru. V prvním případě na obrázku 2 se jedná o pouhý průchod vody skrze hřídel. V druhém případě jde o přímé chlazení rotorového vinutí. Nakonec je zde možná kombinace dvou výše zmíněných možností.

Jiná varianta je přímý kontakt čel vinutí s vodou nebo jiným chladivem. Toho se dosahuje pomocí ostříku čel pod tlakem z trysek. Na obrázku 3 jsou vidět různá umístění trysek. Obecně se této variantě říká spray cooling.

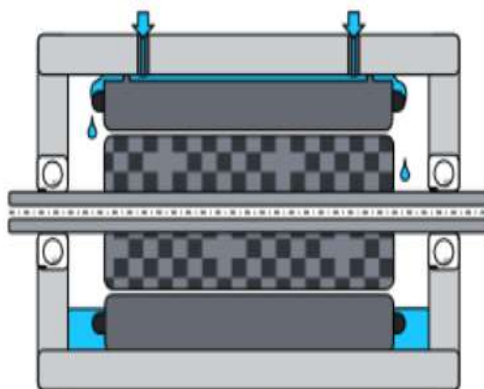


Obr. 3: Příklady vodního chlazení při ostříku čel [2]

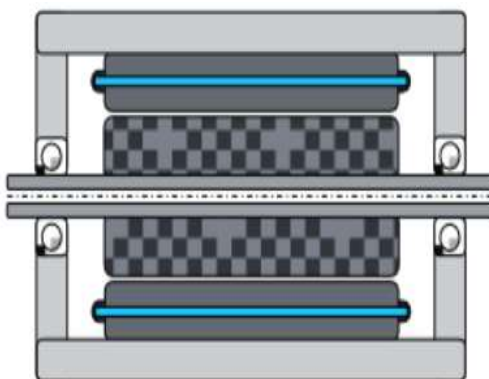
Tento typ chlazení odvádí teplo přímo z vinutí stroje, kde samotné teplo vzniká. Díky tomu se jedná o velmi efektivní možnost chlazení stroje.

Další varianty, se kterými se lze setkat je ještě stékání chladící látky přes čela (Obr. 4), přímým chlazením statorového vinutí (Obr. 5) nebo ostříkování statorových čel pomocí odstředivé síly a tlaku z hřídele (Obr. 6).

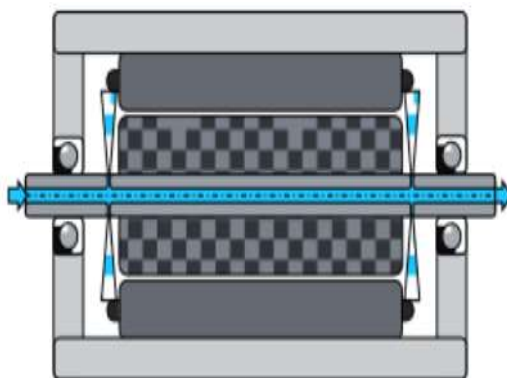
Protože většina těchto pokročilých variant chlazení nabízí primárně chlazení jen určité části stroje, stává se, že se dané varianty mohou kombinovat pro dosažení nejlepších výsledků.[2]



Obr. 4: Příklad chlazení pomocí media stékajícího přes čela vinutí [2]



Obr. 5: Přímé chlazení statorového vinutí [2]



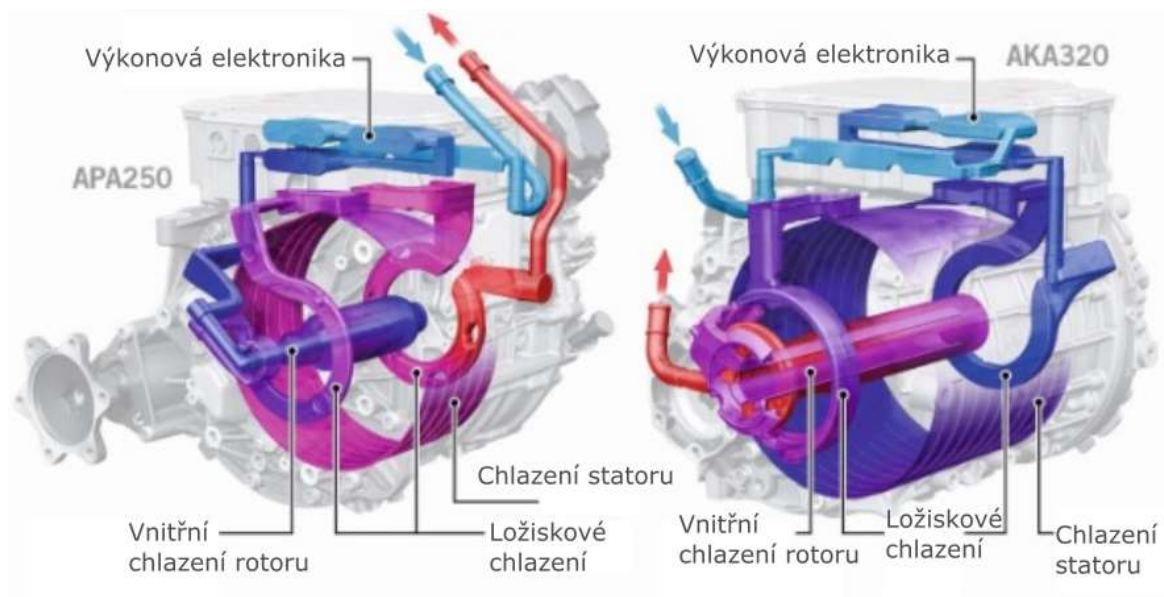
Obr. 6: Ostřík čela statoru z hřídele [2]

## 1.4.2 Příklady aplikací moderních způsobů chlazení

### 1.4.2.1 Audi e-tron 2018

V roce 2018 vyšly informace o pohonné jednotce od společnosti AUDI AG pro elektrická vozidla řady e-tron. V této pohonné jednotce jsou čtyři asynchronní motory, které jsou elektromagneticky podobně navrženy a rozdíl mají v délce železného paketu. Pro odvod tepla z těchto motorů zde byla zvolena kombinace chlazení skrze dutou hřídel a kanály

v kostře. Navíc zde byli chlazeny kapalinou obě ložiska a výkonová elektronika. To vše je v jednom chladícím obvodu pro médium. [12]



Obr. 7: Chladící obvod pro motory společnosti AUDI AG pro vozidla řady e-tron

Na obrázku 7 si lze všimnout postupného navyšování teploty chladiva. To do značné míry ovlivňuje efektivitu chlazení částí, které jsou na konci chladicího okruhu. V případě na pravém obrázku je tedy nejméně chlazené ložisko a rotorová hřídel.

#### 1.4.2.2 Honda i-MMD 2018

Motor pro toto vozidlo je synchronní stroj s permanentními magnety ze vzácných zemin. V tomto případě bylo využito kombinace více způsobů chlazení:

- Chlazení hřídele
- Z duté hřídele ostřík čel statoru
- Přímé chlazení magnetů rotoru
- Stékání chladicího média po čelech statoru

Toto konstrukčně komplexní chlazení vedlo ve výsledku k poklesu teploty magnetů v rotoru o 23 % oproti stejnému, konvenčně chlazenému protějšku. [13]

### 1.5 **Spray cooling**

Chlazení nejen elektrických strojů pomocí metody spray cooling je jedním z efektivnějších způsobů odvádění tepla. S její velkou efektivitou jsou ale spojeny i komplikace a složitost celého procesu. Pro správnou funkčnost musí být správně prozkoumány možnosti chladících

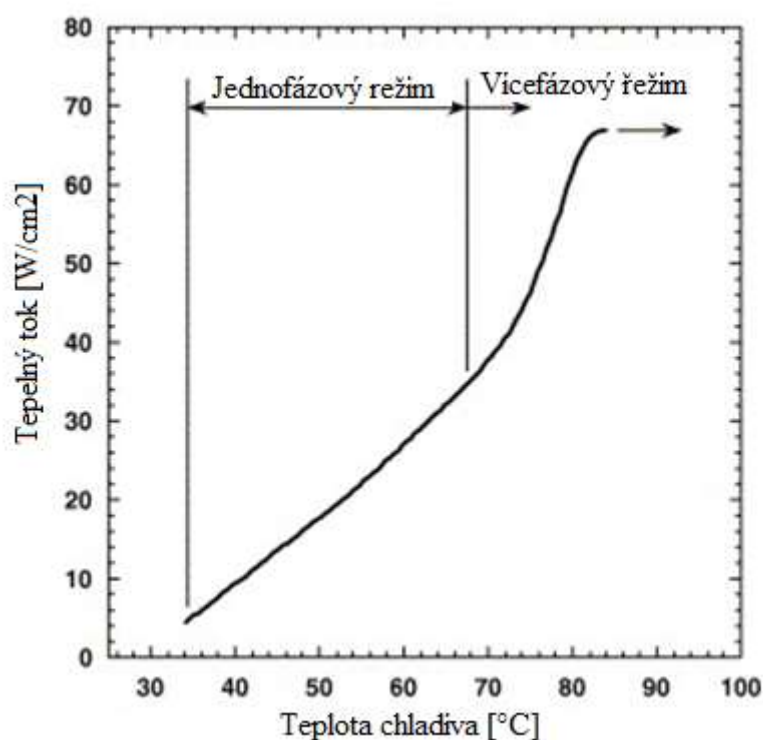
médií, čerpadla pro vsup a odvod chladiva, trysky, možnost dvoufázového (myšleno skupenstvím) chlazení – tedy odpařování chladiva.

Po zvolení všech parametrů se objeví komplikace rovnoměrného dodávání objemu a tlaku chladicího média do každé trysky, a tudíž rovnoměrného odvádění tepla.

### 1.5.1 Chladící médium

Jelikož bude chladící médium v přímém kontaktu s izolací jednotlivých vodičů vinutí statoru elektrického stroje a popř. i rotoru, je potřeba se věnovat elektrické pevnosti daného chladiva a materiálové kompatibilitě. Nesmí docházet k chemickým reakcím mezi chladivem a jakoukoliv částí stroje, včetně izolace vinutí. Dále je zde aspekt ekologický. Existují chladiva vhodná pro chlazení, ale ekologicky jsou závadná, a tudíž nevhodná pro použití v moderní době.

Podle výběru chladiva se řídí i konstrukce celkového chladicího okruhu. Asi nejjednodušší variantou je použití chladiva, které se nebude při aplikaci odpařovat. Poté je jen potřeba chladiče, hlavního čerpadla a pomocných čerpadel pro odvod chladiva zpět ze stroje do obvodu.



Obr. 8: Tepelný tok konvekci v závislosti na teplotě chladiva s bodem varu v 70 °C

Na druhé straně je potom velmi komplikovaná chladící konstrukce s lepšími vlastnostmi chlazení. Jedná se o chladiva ze skupiny CFC – chlorofluorokarbony. Tyto látky mají nízkou

teplotu varu a odpařují se. Tím zvyšují teplo, které pohltní. Pro stroje, které mají nižší pracovní teplotu vinutí jsou tedy dobrou volbou jakožto chladicí médium. Jejich velkou nevýhodou je ale nepříjemný dopad na ozonovou vrstvu. Proto se nepoužívají. Další skupinou jsou HFC – hydrofluorocarbony. Ty mají dopad na ozonovou vrstvu menší o 10 %. Chladicí konstrukce pro tento typ médií jsou nejkomplicovanější. Protože se jedná o dvoufázový typ odvádění tepla, tak je potřeba kondenzačního prostředí, kde se opařená látka ochlazuje a mění zpět na kapalinu. Ta pak vede do chladicího okruhu a zpět na trysky. Výhoda dvoufázového typu chlazení je vidět na obrázku 8. V teplotě okolo 70 °C, kdy dochází k odpařování chladiva se zvyšuje tepelný tok konvekce. [14]

### 1.5.2 Trysky

Trysky jsou základní částí pro spray cooling. Jejich správným zvolením lze předejít špatnému rozložení chladiva a vniku tzv. hot spotům, kde může teplota velmi přesahovat tu předpokládanou. To by mohlo mít za důsledek poškození nebo kompletní zničení izolace vinutí.

Volba trysky záleží na několika parametrech. Jeden z nich je zvolené chladicí médium, které se může velmi lišit svojí viskozitou. Většina průmyslových trysek na trhu jsou vyráběna pro vodu a jí podobné látky. Látky s vysokou viskozitou, jako jsou například oleje, by v těchto tryskách nemusely správně fungovat. Zároveň je důležité volit trysky s ohledem na čerpadlo a tlak, který dokáže dodat.

Při výběru trysky se nahlíží na:

- Vzor rozstříku trysky
- Úhel rozstříku a pokrytí trysky
- Velikost kapiček chladiva
- Vlastnosti chladicího média
- Materiálové vlastnosti samotné trysky

### 1.5.3 Vzor rozstříku

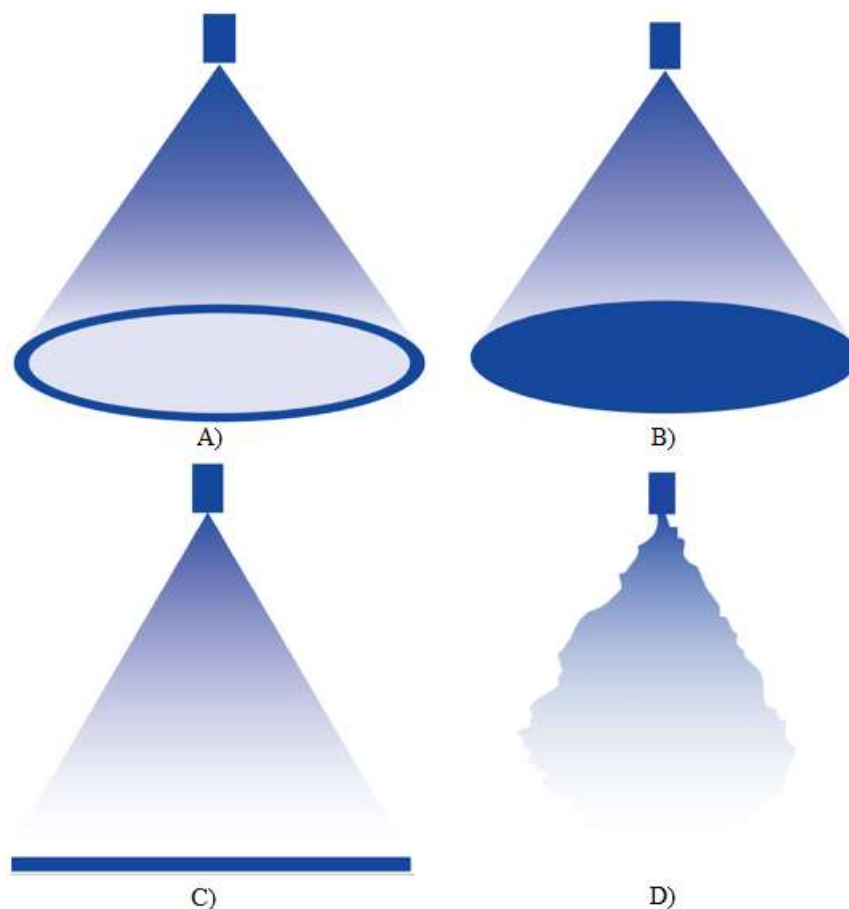
Obecně trysky fungují na principu přeměny proudu tekutiny na kapičky a každý typ trysky k této přeměně přistupuje jinak. Tím vznikají různé varianty ostříkované plochy. Trysky lze rozdělit do čtyř základních variant podle jejich vzoru ostříku:

- Trysky s rozstříkem dutého kužele
- Trysky s plným kuželem



- Trysky s plochým rozstříkem
- Mlžící (rozprašovací) trysky

Nejvíce rozšířené v průmyslových odvětvích jsou trysky s plným kuželem, které dodávají rovnoměrné pokrytí při dopadu. Díky jejich velkému rozšíření existuje také mnoho variant. Tyto trysky mohou mít úhel rozstříku  $15^\circ - 170^\circ$ , průtočné množství od 0,13 do 36 100 l/min, a tlak od 0,3 do 30 barů. [14]



Obr. 9: Typy trysek – A) Tryska s rozstříkem dutého kužele, B) Tryska s plným kuželem, C) Tryska s plochým rozstříkem, D) Rozprašovací tryska [15]

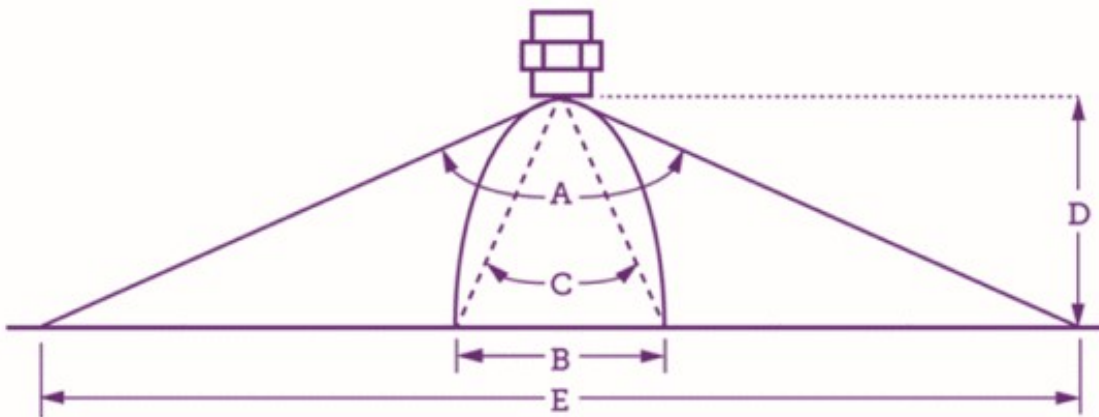
Trysky s rozstříkem dutého kužele mají podobné varianty jako trysky s plným kuželem. Jediným rozdílem je průtočné množství, které je nižší. To vyplývá z daleko menší plochy, která jimi ostříkována.

Trysky s plochým rozstříkem mají výhodu v tom, že vytváří kapičky i při nižším tlaku než předchozí dva typy. Bohužel je ale plocha, která je ostříkována velmi malá a nejsou tak univerzální. [14]

### 1.5.4 Pokrytí rozstříku

Samotná tryska může mít určitý úhel rozstříku. To ale neznamená, že se jedná o efektivní pokrytí chladící kapalinou.

Na obrázku 10 lze vidět parametry vystřikované kapaliny z trysky. Parametr A úhel. Parametr C je efektivní úhel rozstříku dané trysky. Pro tento úhel bychom měli správně trysku vybírat, protože jen zde může dojít k efektivnímu pokrytí chladiva na ploše, kterou potřebujeme. Na parametrech B a E je viditelný rozdíl plochy rozstříku a efektivního rozstříku chladiva. D udává výšku trysky nad plochou ostříku.



Obr. 10: Parametry pokrytí trysky

### 1.5.5 Velikost kapiček média

Velikost kapiček chladícího média je určena typem trysky, která je použita. Z obrázku 9 mají nejmenší velikost kapiček rozprašovací tryska, poté tryska s rozstříkem dutého kužele, tryska s plochým rozstříkem a největší kapičky má tryska s plným kuželem. Velikost kapiček ovlivňuje schopnost chladícího média pokrýt větší plochu chladící plochy, která běžně není bez nerovností. Existuje korelace mezi velikostí kapiček a efektivností celé spray cooling konstrukce. Obecně platí, že menší kapičky znamenají lepší účinnost odvodu tepla. Z tohoto důvodu se zkoumá velikost kapiček a je snaha o jejich zmenšení.

Velikost kapiček je ovlivňována jak konstrukcí samotné trysky, tak látkovými vlastnostmi chladiva. Parametry trysky, které ovlivňují velikost kapiček jsou:

- Geometrie trysky
- Tlak trysky
- Velikost vyústění trysky
- Úhel rozstříku

Parametry látky, které mohou ovlivňovat velikost kapiček jsou:

- Relativní hustota
- Viskozita
- Tlak
- Povrchové napětí

Tlak je důležitý a nejlépe nastavitelným parametrem ze všech zde zmíněných. Při zvětšování tlaku vždy dochází ke zmenšení kapiček kapaliny. Vyšší viskozita znamená tvoření větších kapiček kapaliny. Zvyšování relativní hustoty zmenšuje velikost kapiček. [14]

## 2 Lokalizace tepelných ztrát

Lokalizaci ztrát lze provést pomocí několika měření na zkoumaném stroji. Jedná se o měření naprázdno, měření odporů vinutí a měření nakrátko. Náš zkoumaný stroj je asynchronní motor s kotvou nakrátko. Jeho štítkové hodnoty lze vidět v tabulce 2-1.

Tab. 2-1: Některé štítkové hodnoty zkoumaného asynchronního stroje

MOT 3~	TYPE: AP 132S-6
IP44	
4 kW	50 Hz
Y/Δ 380/220 V	960 ot/min
Y/Δ 9,2/15,9 A	Izolace E

### 2.1 Teorie měření nakrátko a naprázdno

Při měření naprázdno musí být hřídel mechanicky odpojena od jakékoliv zátěže. Díky tomu, že se v našem případě se jedná o asynchronní motor s kotvou nakrátko, nemusí být řešeny kroužky a popř. rozjezdy pomocí odporů. Při tomto měření jsou zjišťovány ztráty v magnetickém obvodu, ztráty mechanické a proud naprázdno.

Nakrátko je měřeno v rozsahu od 130 % do 30 % jmenovitého napětí. Při měření nesmí dojít k poklesu otáček. Pro dodržení této podmínky musí být kontrolováno měření v oblasti s nízkým měřeným napětím, kdy se vyrobený moment stroje může blížit k hodnotě pro pokrytí mechanických ztrát stroje. V tuto chvíli by mohlo dojít ke snížení otáček, přechodu stroje do labilní části své momentové charakteristiky a v krajním případě by mohlo dojít i k jeho zastavení. Pokud předpokládáme, že by se toto mohlo stát, je vhodné měřit skluz a při hodnotě skluzu 1 % měření zastavit. Dalším důležitým aspektem je symetrie napájecího napětí. Nesymetrii by mohlo způsobit použití různých měřících zařízení na vstupu měřeného motoru. Je vhodné tedy měřit shodnými přístroji na všech fázích.

Z měření získáme hodnoty napětí a proudu naprázdno. Z toho lze graficky zobrazit průběh proudu v závislosti na napětí a také účinník.

Měření nakrátko se provádí při zablokovaném rotoru – tj. zabrzděném. Toto blokování musí být dostatečně pevné, aby se stroj nezačal za jakýkoliv podmínek (ani při chybném zapojení na jmenovité napětí) otáčet a nemohlo tak dojít k ohrožení osob nebo zničení objektů v jeho blízkosti. Druhá možnost je tzv. ustřižnutelné mechanické zabrzdění. V tomto případě se počítá s určitým momentem, který je limitní a dojde při něm k povolení otáčení stroje. Z měření lze určit charakteristiku nakrátko, průběh ztrát na krátko a účinník nakrátko. Charakteristika nakrátko je závislost proudu na krátko a napětí nakrátko. Teoreticky by

taková závislost měla být lineární. V praxi se ale setkáváme se sycením zubů na statoru a rotoru. To má za následek větší rozptylové toky. Výpočetně se tato problematika řeší jako zvětšení vzduchové mezery, protože přesycené železo má výrazně nižší permeabilitu. Při tomto postupném sycení zubů dochází ke zvyšování derivace charakteristiky nakrátko. Po nasycení už křivka dále stoupá, jak bychom teoreticky očekávali. Pro výpočet proudu nakrátko při jmenovitém napětí musíme aplikovat lineární extrapolaci, ze které vychází vztah:

$$I_{kn} = \frac{U_n - U_{k0}}{U_k - U_{k0}} \cdot I_k \quad (2.1)$$

Kde je:

- $I_{kn}$  – proud nakrátko při jmenovitém napětí
- $U_n$  – jmenovité napětí
- $U_{k0}$  – hodnota napětí nakrátko při teoretickém nulovém proudu nakrátko, která se získá prodloužením přímkové části charakteristiky nakrátko a jejího průniku s osou napětí nakrátko
- $U_k$  – napětí nakrátko
- $I_k$  – proud nakrátko

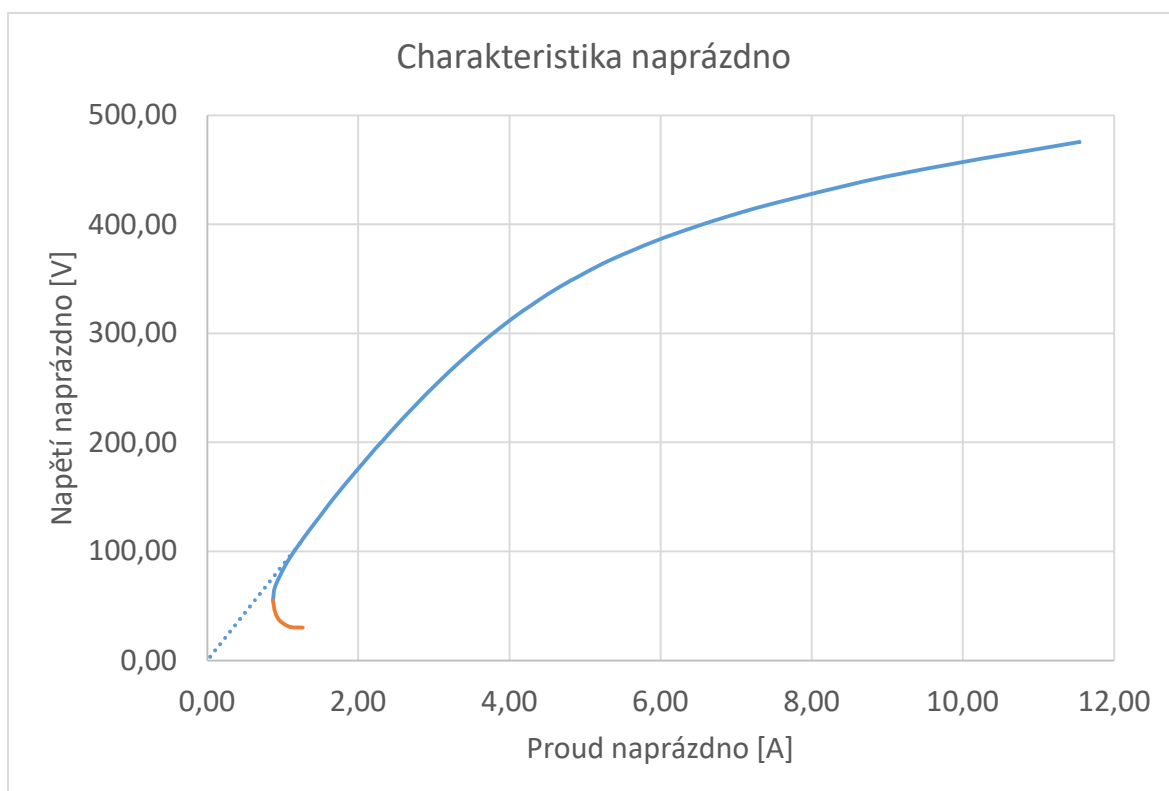
Pro proud  $I_k$  platí předpoklad, že roste tečně k naměřené charakteristice. Zároveň se zde udává odchylka 10–20 %. Pro získání správné části naměřené charakteristiky, která není ovlivněná sycením železa, se měří se nakrátko pro vysoké hodnoty proudů. Jedná se o 150–200 % jmenovitého proudu. Z toho plynou určité komplikace při měření. Největší z nich je pravděpodobně rychlý ohřev vinutí, který může zkreslovat výsledky změnou svého odporu. Dále se může zahřát vinutí natolik, že dojde k poškození izolace. Z toho důvodu se měření provádí velice rychle a nejlépe při automatickém odečítání hodnot. Pokud nemáme možnost automatického odečítání hodnot, je zde možnost stroj zapnout pro měřenou hodnotu napětí, odečíst proud a poté odpojit. Toto pak opakovat do potřebných a možných hodnot.

Ztráty nakrátko jsou tvořeny Joulovými ztrátami ve vinutí statoru a rotoru a poté přídavnými ztrátami. V případě určování přídavných ztrát je potřeba znát odpory obou vinutí (stator a rotor) a také převod stroje. To je v případě stroje s klecí nakrátko nemožné změřit, a proto se dané ztráty nedají ani s přesností určit. [16]

## 2.2 Praktické měření a výsledky měření nakrátko a naprázdno

### 2.2.1 Měření naprázdno

Při měření byl námi měřený stroj již připojený skrze spojku ke stroji, který byl totožný. Docházelo tedy k pokrývání mechanických ztrát obou strojů. Změřené mechanické ztráty tedy musely být vyděleny dvěma. To bylo možné udělat díky identičnosti strojů. Vzhledem ke stáří strojů bylo ale velmi pravděpodobné, že mechanické ztráty nebudou naprosto identické a byla tím tedy do konečného výpočtu zanesena chyba. Nebyl zde ale předpoklad, že by se jednalo o tak velkou chybu, která by ovlivnila konečné výsledky práce.



Obr. 11: Charakteristika naprázdno měřeného stroje

Naměřená charakteristika naprázdno byla rozdělena do tří částí. Hlavní částí byla plná modrá křivka, která zobrazovala naměřené hodnoty, které byly platné. Druhou částí byla oranžová část křivky, která znázorňovala naměřené hodnoty již neplatné. Poslední částí byla modrá tečkovaná část křivky, která sloužila jako teoretické znázornění charakteristiky naprázdno do nuly.

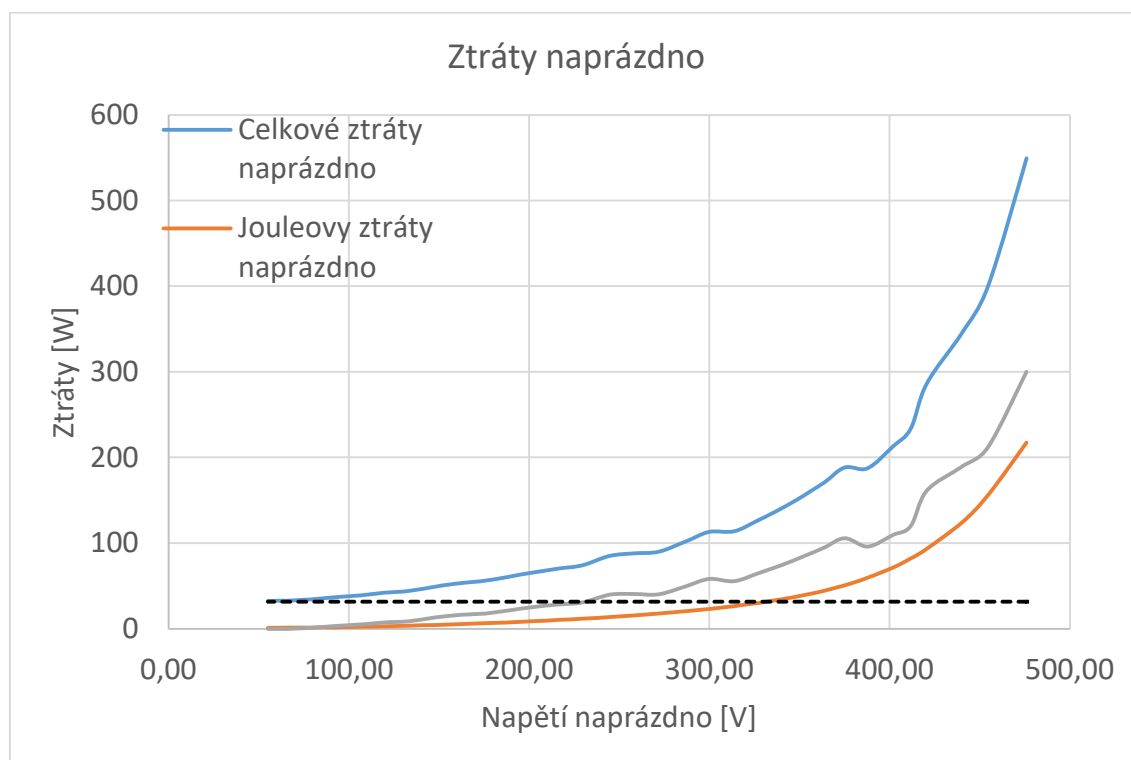
Ztráty, které byly získány tímto měřením byly rozděleny na Jouleovy ztráty ve vinutí statoru, ztráty v železe a mechanické ztráty.

$$\Delta P_0 = \Delta P_{j0} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech}$$

Ztráty Jouleovy mohly být dopočítány ze znalosti naměřených odporů vinutí. Poté odečtem od celkových naměřených ztrát vzniknou ztráty v železe a mechanické.

$$\Delta P_0 - \Delta P_{j0} = \Delta P_{Fe} - \Delta P_{mech}$$

To by platilo, kdyby bylo měřeno na jednom samotném stroji. V našem případě bylo měřeno na již propojených strojích a proto, stejně jako byl již zmíněno výše, byly zde výsledné mechanické ztráty dvojnásobné.



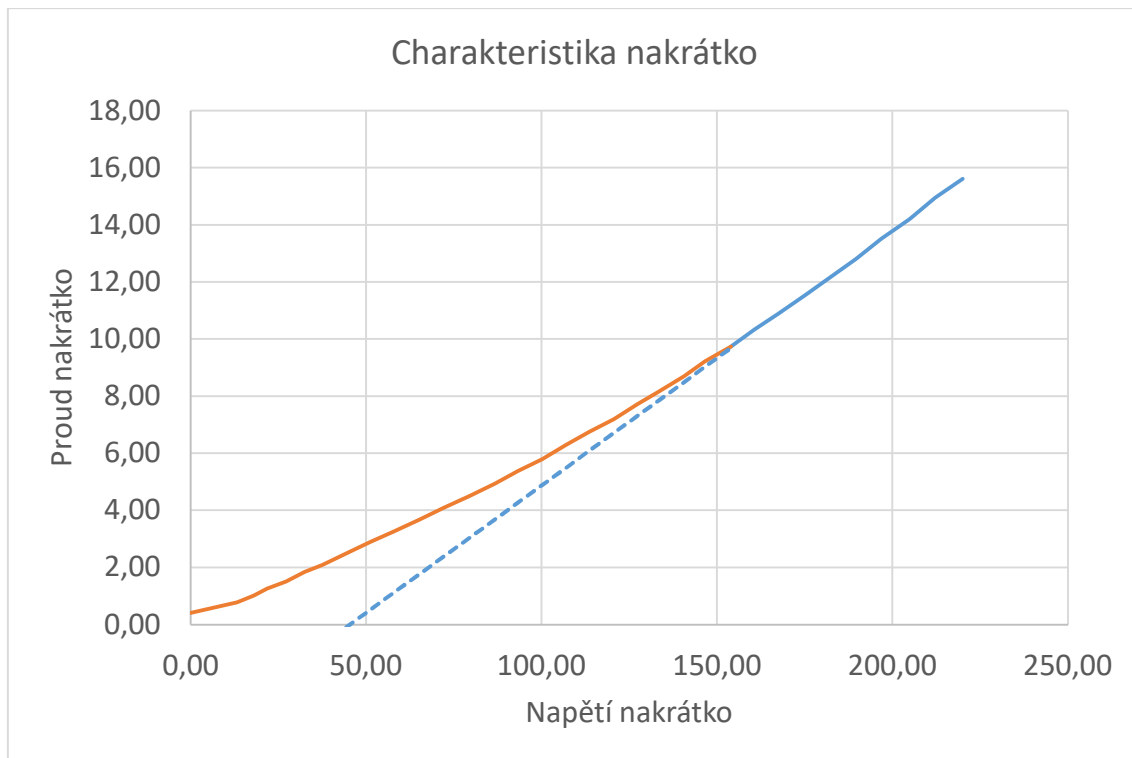
Obr. 12: Ztráty z měření naprázdno

Na grafu výše byly znázorněny ztráty z měření naprázdno. Mechanické ztráty zde byly jen odečtem hodnoty při nulových Jouleových ztrátách. Jako jediné byly po celou dobu měření neměnné, a proto byly znázorněny konstantní přímkou. Pro jmenovité proudy byly určeny hodnoty ztrát:

- Ztráty ve vinutí: +/- 130 W
- Ztráty v železe: +/- 105 W
- Ztráty mechanické: +/- 32 W

### 2.3 Měření nakrátko

Měření nakrátko probíhalo v zapojení do trojúhelníka. Proto je napětí na svorkách menší než při měření naprázdno.



Obr. 13: Charakteristika nakrátko měřeného stroje

Na obrázku 13 byla vyznačena oranžová část charakteristiky nakrátko, která byla ovlivněna sycením zubů statoru a rotoru. Modrá plná barva byla použita pro zvýraznění přímkových dat z měření bez vlivu sycení. Tečkovaná modrá barva byla určena pro teoretické zobrazení přímkového průběhu, kdyby zde nebyl vliv sycení zubů. Z měření nakrátko byly získány informace o ztrátách ve statorovém a rotorovém vinutí:

$$\Delta P_k = \Delta P_{jk} + \Delta P_d$$

Pro přesné zjištění ztrát v rotory by byly potřeba znát proudy a odpory rotorového vinutí. To bylo ale nemožné získat pro asynchronní stroj s kotvou nakrátko. Proto byly zjištěny jen ztráty plus přídavné ztráty v rotoru:

- Ztráty v rotorovém vinutí plus přídavné ztráty: +- 320 W



### **3 Konstrukční úprava asynchronního motoru a způsobu chlazení**

Pro možnost chlazení měřeného asynchronního stroje pomocí metody spray cooling, bylo potřeba si uvědomit, na co všechno může mít chladící médium ve stroji vliv, jak jej do stroje dostat a jak jej chladit.

První potřebnou částí, která se objevila, byla celková konstrukce ústrojí, které mělo za úkol fungovat jako základní rozvod chladícího média na trysky.

Další problém byla ložiska, která byla velmi náchylná na kapaliny a mohlo dojít k jejich zadření. Aby tomuto bylo zabráněno, bylo rozhodnuto o výrobě labyrintů pro jejich ochranu. Nakonec byly předělány samotné ložiskové štíty.

#### **3.1 Ústrojí pro chlazení a rozvod média**

Celé ústrojí bylo vytvořeno za účelem rozvodu a chlazení média. Před začátkem vytváření byly zadány základní předpoklady, které byly potřeba splnit:

- Z ústrojí muselo být vyvedeno osm výstupů. Pro každý ložiskový štít byly zvoleny čtyři vstupy pro čtyři trysky.
- Ústrojí muselo obsahovat hlavní čerpadlo pro rozvod kapaliny.
- Ústrojí muselo obsahovat dostupný chladič Sahara ze starého automobilu.
- Ústrojí muselo mít schopnost měřit průtok, tlak a teplotu kapaliny.
- Musel být umístěn filtr před čerpadlo, pro jeho ochranu před pevnými částicemi.
- Ústrojí muselo být jednoduše přemístitelné.
- K ústrojí musel být připevněn frekvenční měnič pro řízení čerpadla.

Pro samotnou konstrukci ústrojí byly vybrány hliníkové profily. Důvodem byla jednoduchá možnost manipulace, změna velikosti, nedestruktivní možnost spojování mezi sebou a dalších potřebných částí. Vzhled zvolených profilů lze vidět na obrázku 14. Typ hliníkového byl zvolen čtvercový o velikosti hrany čtyřicet milimetrů. Z hliníkových profilů byl vytvořen rám, na který bylo upevněno čerpadlo, potrubí a chladič. Na spodní části hliníkového rámu byla připevněna základní kolečka pro jeho jednoduchou manipulaci.



Obr. 14: Vzhled hliníkového profilu [17]

Důležité parametry čerpadla jsou:

- Napájení: 3f~ 400 V, 50 Hz
- Maximální teplota kapaliny: 90 °C
- Nominální průtok média: 28,3 l/min
- Maximální tlak: 1 MPa
- Maximální teplota okolí: 55 °C

Čerpadlo bylo řízeno frekvenčním měničem, který byl také upevněn na hlavní konstrukci ústrojí. Frekvenční měnič řídil čerpadlo přímo na počet otáček čerpadla.

Důležitou částí bylo potrubí vytvořené pro rozvod a rozdělení chladicí kapaliny. To bylo vytvořeno z mosazných topenářských součástí a měděných trubek. Finální vzhled byl založen na několika požadavcích.

Na samotné potrubí byly také kladeny nároky. Prvním z nich bylo připojení průtokoměru. Ten potřeboval určitou část před jeho vstupem rovnou bez ohybů, kolena a čerpadla. Bylo tomu tak, protože kapalina, která jím protékala, potřebovala být převážně laminárního charakteru, nikoliv turbulentního. Již zmíněné ohyby, kolena a čerpadlo všechny víří kapalinu a tvoří primárně turbulentní proudění. Pro náš průtokoměr byla podmínka patnáctinásobku průměru potrubí jako vzdálenost od nejbližšího ohybu a dvaceti-

pětinásobku průměru potrubí od čerpadla. Pro splnění těchto podmínek byly zapojeny měděné prodlužovací trubky.

Druhý nárok na potrubí byla nutnost připojení odvzdušňovacího ventilu. Ten musel být připojen v nejvyšším bodě potrubí. Jediná podmínka, která nás omezovala v umístění, bylo respektování prvního nároku pro průtokoměr. Finální konstrukce je vidět na obrázku 15.

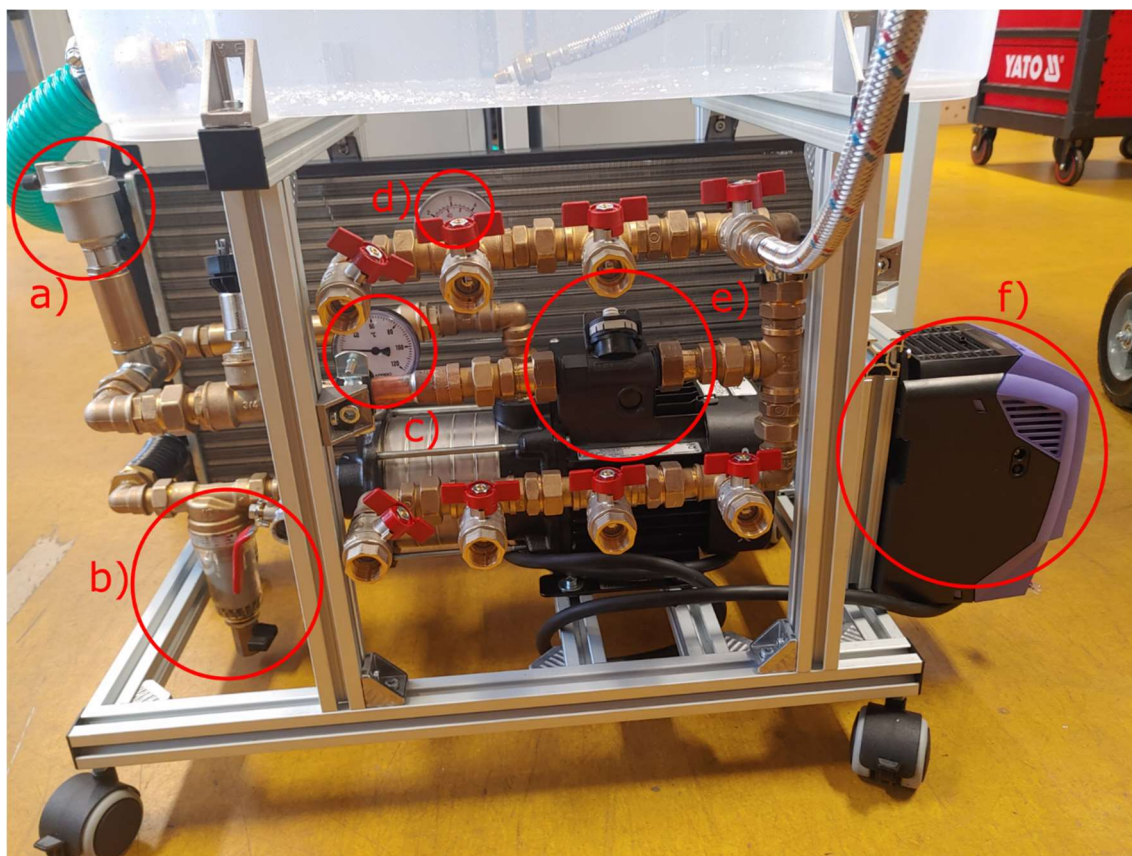
Dále bylo řešeno správné provedení potrubní pro daný počet výstupů. Pokud bychom chtěli na každém výstupu z osmi udržet stejný tlak, museli bychom dělat řadu rozdělení potrubí, což by bylo finančně, konstrukčně a prostorově náročné. Proto byl zvolen jednodušší přístup.

Finální verze měla jedno rozdělení na dvě samostatné části. Každá část pak obsahovala čtyři vývody ven přes samostatný ventil. V případě potřeby pak mohlo dojít k částečnému nebo úplnému uzavření ventilů. Každá část byla připojena na jeden ložiskový štít.

Celý návrh byl pouze prototypem, a proto byla snaha o minimalizování nákladů na celkové sestavení. Finální vytvořená verze je vidět na obrázku 15. Lze na něm vidět:

- a) Odvzdušňovací ventil
- b) Filtr před čerpadlem
- c) Teploměr
- d) Barometr
- e) Průtokoměr
- f) Frekvenční měnič

Dále je na obrázku 15 vidět nad konstrukcí plastová nádoba pro přívod kapaliny zpět ze stroje. Tato nádoba byla napojena na chladič, který lze vidět na pozadí konstrukce, zelenou trubicí. Chladič byl nakonec připojen na filtr pevných částic, který chrání čerpadlo.



Obr. 15: Konečná verze ústrojí pro rozvod chladicího média

K ústrojí dále patřila dvě mešní membránová čerpadla, která vracela vodu z měřeného stroje zpět do nádoby před chladičem. Pro aplikaci důležité parametry byly:

- Napájení: 10-14 V DC
- Maximální odebíraný proud: 2 A
- Maximální tlak: 0,48 MPa
- Průtok: 3,5 l/min
- Výtlačná výška: max 4 m

Membránový typ čerpadla byl zvolen z několika důvodů. Prvním z nich byla možnost fungování bez potřeby sání jen kapaliny. Membránová čerpadla byla schopna sát chladicí medium s obsahem vzduchu bez poškození. To bylo velmi přínosné v následném nastavování množství chladicí kapaliny. Další nespornou výhodou membránových čerpadel byla schopnost čerpat malé pevné částice společně s kapalinou. Protože se jednalo o starší stroj, byla dost pravděpodobné, že se některé pevné částice v oběhu kapaliny objeví. Pokud bychom zvolili klasické čerpadlo, byl by potřeba další filtr. Poslední výhodou je možnost aplikování těchto čerpadel pro různé typy chladiv včetně olejů.

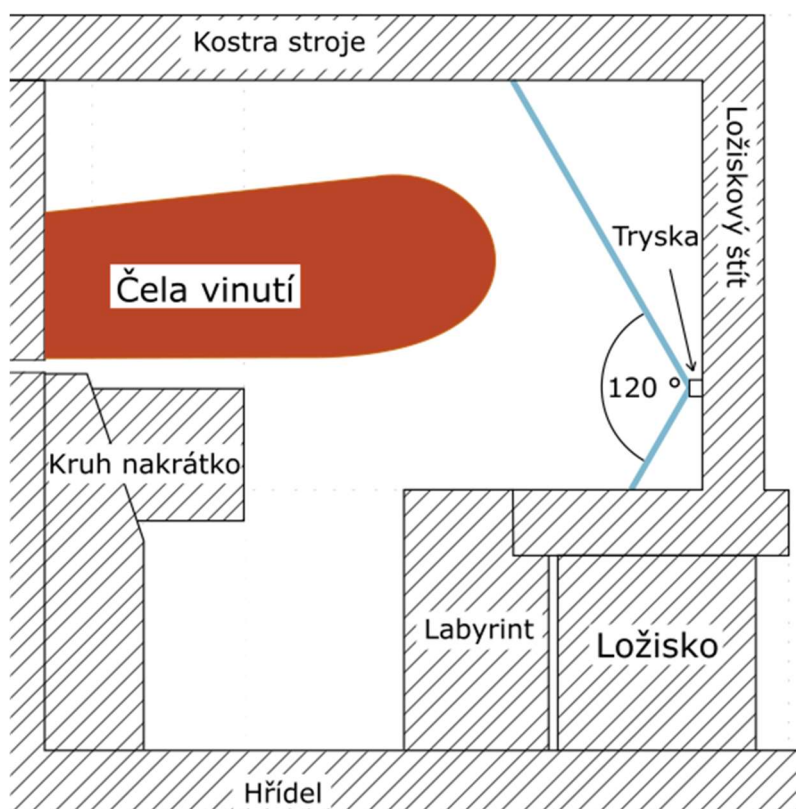
### 3.2 Změna na ložiskových štítech

Samotné ložiskové štíty neprošli velkou úpravou. Jedinou zde probíranou změnou bylo určení místa pro vyvrtání děr, do kterých měly být vsazeny trysky. Jedna díra navíc byla vyvrtána ve spod stroje určená pro odtok chladicího média.

Umístění děr bylo zvoleno na základě dostupných trysek. Naše trysky měly rozstřík  $120^\circ$ . Jednalo se o trysky s rozstříkem dutého kužele. Samozřejmě byla vyvinuta snaha umístit trysky tak, aby chladicí médium pokrylo co největší plochu vinutí statoru a popř. i rotoru.

Velkým omezením byla nemožnost vrtání děr pod jiným úhlem než kolmým k ložiskovému štítu. I když to bylo technologicky možné takové díry vrtat, bylo by velmi složité každou díru vyvrtat pod stejným úhlem. To by zapříčinilo nerovnoměrné chlazení vinutí.

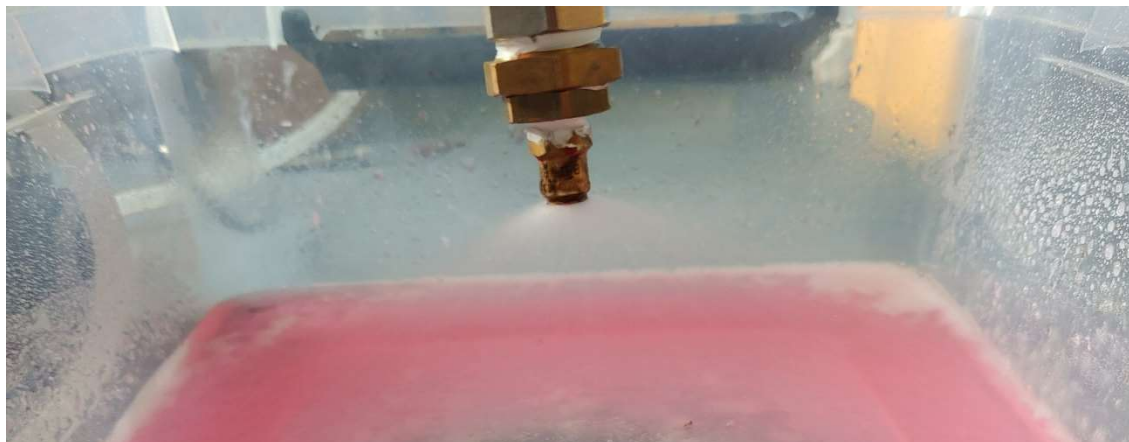
Finálními omezeními byl malý počet trysek a různé provedení ložiskového štítu na straně hřídele a na straně ventilátoru. Kvůli omezení počtu trysek nemůžeme ostříkovat vinutí po vnějším obvodu čel statoru. V případě s pouze čtyřmi tryskami našeho typu na celé čelo bychom ho nedokázali pokrýt.



Obr. 16: Rozstřík trysky uvnitř uzavřeného stroje

Další variantou byla možnost umístění trysek do ložiskového štítu přímo naproti statorovému a rotorovému vinutí. Tato varianta se jevila jako nejlepší a nejjednodušší v našem případě. Poslední věc, která se musela rozhodnout byla výška umístění nad ložisky.

Jak lze vidět na obrázku 16, rozstřík trsky 120° byl ale velmi velký a nebylo možné usadit trysku tak, aby ostříkovala přímo čela vinutí.



Obr. 17: Rozstřík použité trysky

Předpokládaný pohyb chladiva uvnitř stroje byl takový, že z trysek měla část kapaliny stříkat nad vinutí, ze kterého měla stékat dolů. Část této kapaliny měla cestou dolů narážet do rotorového kruhu nakrátko, který měl vlastní výběžky pro víření vzduchu uvnitř stroje. Při dopadu na toto rotorové vinutí docházelo k tříštění a dále různými směry včetně vinutí statoru. Velká část kapaliny vystupující z trysky ale nemusela přijít do styku s vinutím. Veliká část kapaliny se s vinutím dostala do styku až při odražení z jiné stěny. Důvodem pro toto byly primárně špatně zvolené trysky.

Pro ochranu ložiska před touto kapalinou byly aplikovány labyrinty

### 3.3 Konstrukce labyrintu

Po úpravě bylo do asynchronního stroje vstříkováno kapalné médium a bylo nanejvýš pravděpodobné, že bez ochrany by se kapalina dostala i do ložisek. Aby se tomu tak nestalo, bylo rozhodnuto, že bude vytvořen ochranný prvek – labyrint.

Pro jednodušší nasazení labyrintu na hřídel bylo rozhodnuto, že bude vytvořen ze dvou částí, které měly hřídel obepínat. Díky tomu odpadla potřeba sundávat druhý ložiskový štít z hřídele.

Metodou pro vytvoření labyrintu byl zvolen 3D tisk. Do toho spadaly určité komplikace a zjednodušení. Největší výhodou byla možnost vytvoření prototypů a množství materiálů, ze kterých mohl být labyrint vytvořen.

První, a běžné veřejnosti v dnešní době nejdostupnější, byl materiál PLA – polylactic acid neboli kyselina polymléčná. Tento první výtisk posloužil velmi dobře pro pochopení tvarů a možných budoucích komplikací. Bohužel měl tento materiál velmi nízkou teplotu tání, která

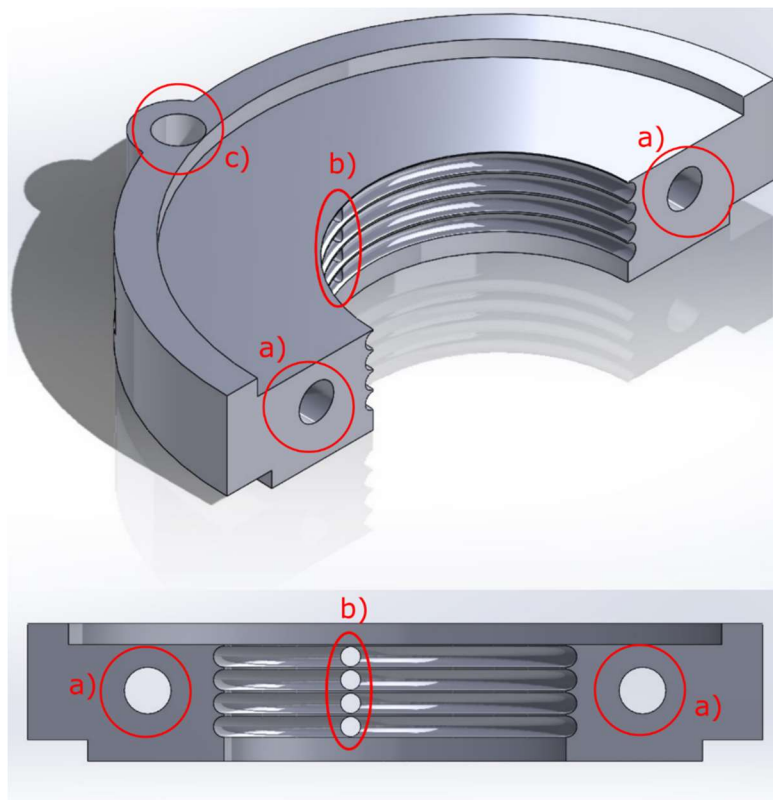
začínala na 64 °C.[18] To mohlo zapříčinit komplikace na místech, kde dochází ke styku hřídele a labyrintu. Třením by zde mohlo vznikat velmi vysoké teplo, které by mohlo zdeformovat nejdůležitější část labyrintu. Ten by poté mohl ztratit svou funkčnost.

Abychom tomuto zabránili, zvolili jsme pro tisk finální verze jiný materiál. Tento materiál je zároveň tisknut pomocí jiné aditivní technologie v tzv. sintrovací peci. Název materiálu byl PA 12 – polyamid 12 neboli nylon 12. Bod tání tohoto materiálu byl více než dvojnásobný oproti PLA a jeho hodnota byla 130 °C.[19] I když jsme nebyli schopni s jistotou říct, zdali tento materiál nebudou provázet stejné komplikace jako PLA, byla to lepší a bezpečnější varianta. Jistotu jsme měli v tom, že tento materiál nebude měknout vlivem teploty vody, která na něj bude dopadat, protože hodnota 130 °C byla vyšší, než byla teplotní třída izolace. Nevýhodou tohoto materiálu byla především jeho pórovitost.

Komplikace nastaly i se samotnou technologií 3D tisku. Při zadávání pro tisk musela být zohledněna teplotní roztažnost materiálu. Největší nevýhodou bylo špatné tisknutí děr v materiálu. Při tisku docházelo ke spékání prášku, který ale po spečení vrstvy není odstraněn. Po dokončení tisku musela být celá součástka řádně vyčištěna. Vyčištění děr není vždy naprosto možné a bylo potřeba s tím počítat již při návrhu v softwaru. Poslední nevýhodou byla spotřeba materiálu. Touto technologií nelze tisknout duté součásti. To zvyšuje celou cenu tisku.

Na obrázku 18 lze vidět polovinu konstrukce celého labyrintu. Veškeré díry musely být vytisknuté rovné bez ohybu pro možnost jejich vyčištění. Tvar je daný místem, kam měl být labyrint umístěn.





Obr. 18: Polovina konstrukce labyrintu určena k 3D tisku

Popis obrázku:

- a) Díry pro spojení dvou polovin labyrintu
- b) Díry pro odtok kapaliny, která se dostala do labyrintu
- c) Díra pro připevnění poloviny labyrintu k ložiskovému štítu

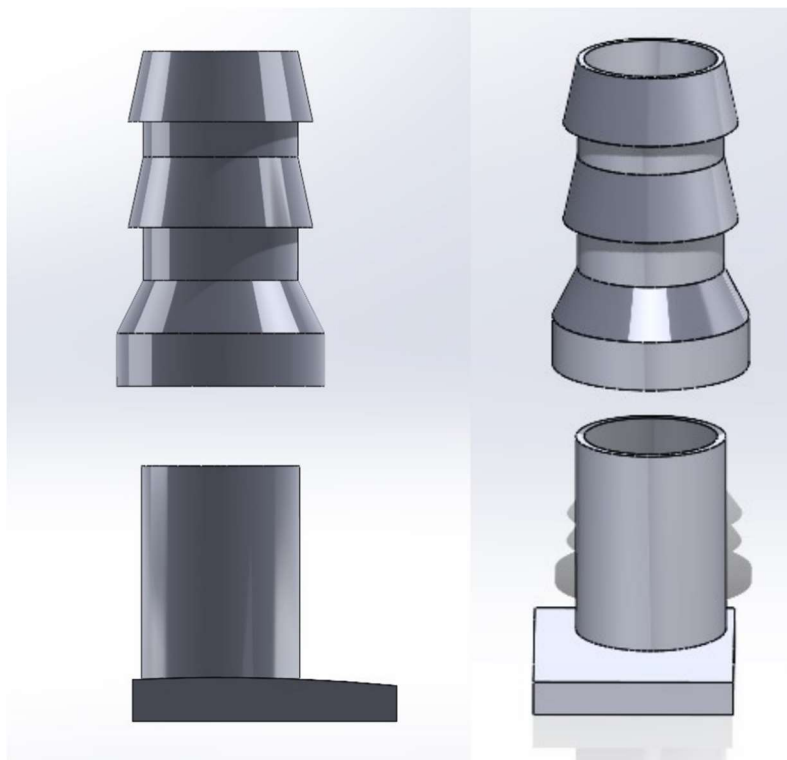
Druhá část byla téměř symetrická. Hlavním rozdílem od té první byla absence děr pro odtok kapaliny. Poté zde ještě byla lehká změna ve vstupu děr na vnější části labyrintu.

### 3.4 Finální úpravy na motoru

Mezi finální úpravy na asynchronním stroji patřilo zaplněný spár tmelem, abychom zabránili jakýmkoliv průtokům chladicího média. Také se museli zaplnit díry z předchozích měření, které nebyli nijak využity. Jediná díra byla ponechána zaplněna jen špuntem pro možnost nahlédnutí dovnitř stroje během provozu pomocí endoskopu.

Největším problémem v této části bylo umístění otvorů a vymyšlení nasazení trubice pro odvod chladiva ze stroje. Nejjednodušší variantou se zdálo vytvoření trnů pomocí 3D tisku z klasického PLA materiálu. Nepředpokládalo se, že by teplota kapaliny byla vyšší než 64 °C a nehledal se tedy jiný materiál.





Obr. 19: Návrh trnu v programu Solidworks

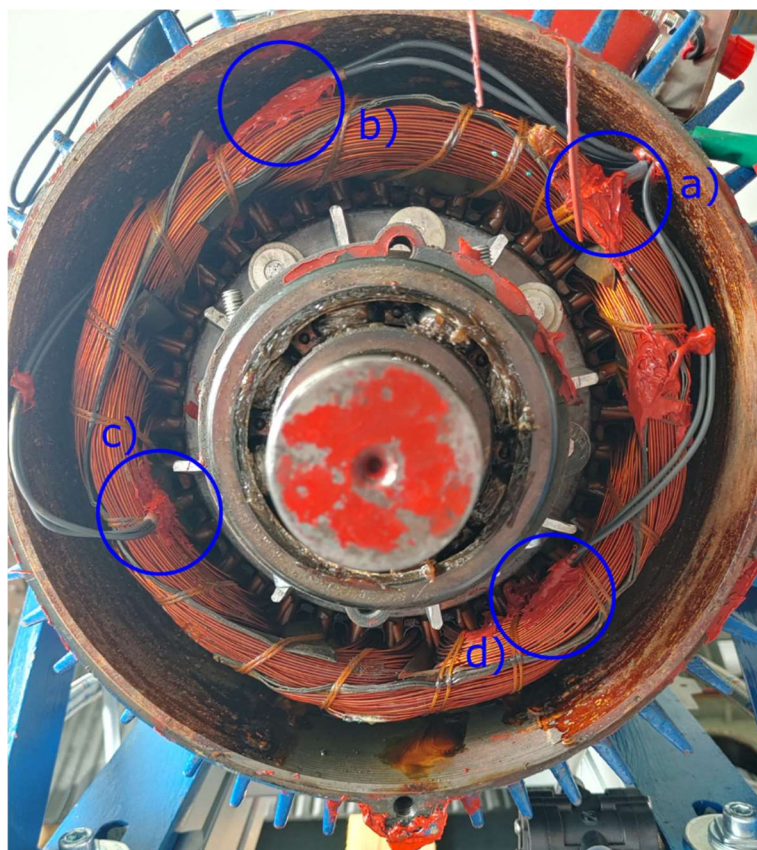
Trn byl navržen ze dvou částí, které obepnuly konstrukci ložiskového štítu. Rozměry potřebné pro navržení byly zvoleny na základě trnů ze zvolených membránových čerpadel pro jednodušší připojení hadiček. Trny byly pro lepší odolnost přilepeny lepidlem. Nevýhodou použití trnů bylo vyvýšení hladiny kapaliny, která bude zůstat ve stroji. Naštěstí byla hladina dostatečně malá a nevytvářelo to další komplikace.



Obr. 20: Trn nasazený na ložiskový štít

## 4 Postupy měření

Vše bylo měřeno při spojení dvou shodných asynchronních motorů, které jsme měli k dispozici. Motory byly ustaveny na vytvořené konstrukci z hliníkových profilů o rozměrech 50 x 100 milimetrů. Samotná konstrukce s motory pak byla postavena na gumové podložky pro snížení hluku. Pro měření teploty byly na stroj upevněny PT články.



Obr. 21: Umístění PT článků na čela vinutí NDE strany stroje

Na obrázku 21 lze vidět umístění PT článků. Na jedno čelo připadali čtyři PT články:

- a) Umístěný ze přední strany čel vinutí
- b) Umístěný ze strany kostry
- c) Umístěný ze strany hřídele
- d) Umístěný ze zadní strany čel vinutí

Na druhém čele, DE straně, došlo k totožnému rozmístění také čtyř PT článků. Dále zde by další dva PT články pro měření teploty na kostře a ložiskovém štítu DE strany.

#### **4.1 Měření na sucho zjišťovací**

První měření bylo provedeno pro zjištění provozních teplot vinutí při určitém napájení. Asynchronní stroj, který byl modifikován na spray cooling byl označován jako M1. Motor, který zůstal na základním chlazení byl označován jako S1.

S1 stroj byl v prvním měření napájen z frekvenčního měniče. Díky tomu mohl fungovat jako zatěžovací motor pro stroj M1. M1 stroj byl připojen přímo na síť a měl fungovat jako generátor. Pro každý ze strojů bylo připojeno digitální měřící zařízení, pro zjišťování hodnot proudů, napětí, výkonů, účinnků apod.

Prvním problémem tohoto měření byla nemožnost zapojení měřícího zařízení za frekvenční měnič. Kvůli průběhům napětí, která vystupují z frekvenčního měniče bylo nemožné naměřit skutečné hodnoty. Z toho důvodu byl frekvenční měnič připojen těsně před napájený stroj S1. To zanášelo do měření velkou chybu. Měřeny byly hodnoty frekvenčního měniče a stroje S1 najednou bez možnosti je odlišit. Druhý stroj byl měřen bez problémů, jelikož napětí z asynchronního generátoru se teoreticky blížili sinusovému.

Z této problematiky vychází další komplikace. Nedokázali jsme určit přesný výkon dodávaný do stroje. Nemohli jsme jej tedy dát do jmenovitého stavu a dokážeme jen předpokládat, kolik výkonu do stroje S1 šlo. Ze stroje M1 byl také měřen jen elektrický výkon do sítě, a nikoliv jeho ztráty. Zde jsme ale díky měření nakrátko a naprázdno dokázali ztráty při procházejícím proudu alespoň s určitou přesností odhadnout.

Samotné měření probíhalo ve 2 fázích. V tzv. boost fázi, kdy jsme do stroje S1 přivedli větší výkon, než je jeho jmenovitý. To způsobilo rychlejší oteplení vinutí stroje. Když jsme se dostali na určitou hodnotu teploty vinutí, bylo změněno napájení stroje pod jmenovité hodnoty. Boost jsme prováděli na vstupním výkonu frekvenčního měniče 4 800 W. Zlom v teplotě vinutí, kde jsme přepnuli na nižší hodnotu výkonu byl 90,1 °C průměrné hodnoty teploty vinutí stroje S1. Snížený výkon jdoucí do frekvenčního měniče byl 4000 W. Měření bylo ukončeno po stabilizování teplot na vinutí stroje M1.

#### **4.2 Měření se spray cooling testovací**

Druhé měření probíhalo již s aktivním chlazením pomocí metody spray cooling. Zapojení bylo totožné jako v měření na sucho. Jediným rozdílem bylo tedy chlazení stroje M1, který fungoval v generátorickém režimu do sítě. Cílem tohoto měření bylo otestovat schopnost vinutí stroje mechanicky odolat chladicímu médiu vstřikovanému přímo na něj a jestli nedochází k průrazu izolace vinutí vlivem zhoršených podmínek provozu.

Toto měření probíhalo v zatížení prvního stroje stejně jako při prvním měření. Výkon dodávaný na vstupu frekvenčního měniče byl 4 000 W. Díky tomu bylo možné porovnat teploty vinutí na M1 stroji před a po aktivaci spray coolingu a zjistit první výsledky.

Nevýhodou zde je, že stroj není přetěžován a tedy nezjišťujeme, jaký výkon navíc bychom dokázali ze stroje M1 získat.

Komplikace tohoto měření byla v nastavení správného množství chladicího média, které dokáže membránová čerpadla odvést ze stroje zpět do chladicího ústrojí. Jejich maximální průtočné množství bylo 3 l/min. Velké čerpadlo tedy muselo být nastaveno na hodnotu otáček, při kterých budou membránová čerpadla schopna odvádět veškeré chladicí médium. Kdyby tomu tak nebylo, mohlo by dojít ke stoupnutí hladiny ve stroji, která by se dostala až k výšce ložiska. Před tímto by bohužel vyrobené labyrinty ložiska neochránili a došlo by k jejich poškození. Další parametr, který byl hlídán bylo minimální potřebné průtočné množství pro správný chod trysek. Při nižším průtoku chladicího média tryskami by nedocházelo k jejich správné funkci. Byly zde tedy dvě ohraničení pro správný chod cirkulace chladiva. Z horní strany bylo ohraničení maximálním možným průtokem skrze membránová čerpadla. Ze spodní strany poté minimálním potřebným množstvím pro trysky. Finální nastavení bylo 550 ot/min na hlavním čerpadle. To pak dodávalo dostatečné průtočné množství pro trysky. Průtok byl 2,26 l/min skrze jedno membránové čerpadlo. To mělo za následek částečné sání vzduchu. Kvůli stáří strojů docházelo k výtoku velkého množství nečistot ze stroje. To ale membránová čerpadla zvládla bez problémů

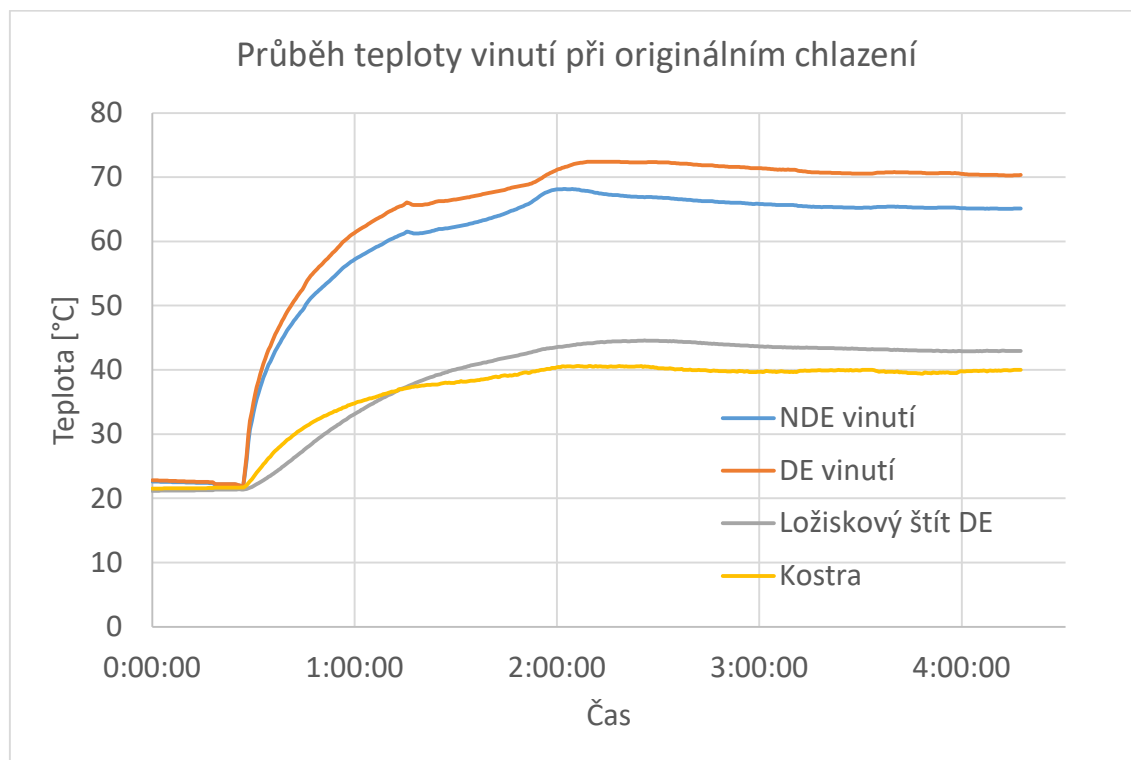
### **4.3 Měření se spraycooling s frekvenčním měničem**

Po zjištění, že izolace vinutí zvládá generátorický režim s chlazením kapalinou, bylo rozhodnuto přejít na možnost napájení frekvenčním měničem. Ten kvůli spínání napětí vytváří napěťové špičky, které už mohli být pro izolaci vinutí destruktivní a mohlo dojít k průrazu. Zapojení v tomto případě bylo totožně jako v předchozích měřeních. Jen se prohodili stroje S1 a M1. Stroj M1 se chová jako motor a stroj S1 se chová jako generátor do sítě. Díky tomuto otočení jsme schopni vyzkoušet přetížení motoru M1 alespoň částečně.

## 5 Porovnání výsledků

### 5.1 Porovnání prvního a druhého měření

Porovnání výsledků je možné velmi dobře z naměřených hodnot teplot vinutí prvního a druhého měření.



Obr. 22: Průběh teploty vinutí u prvního měření

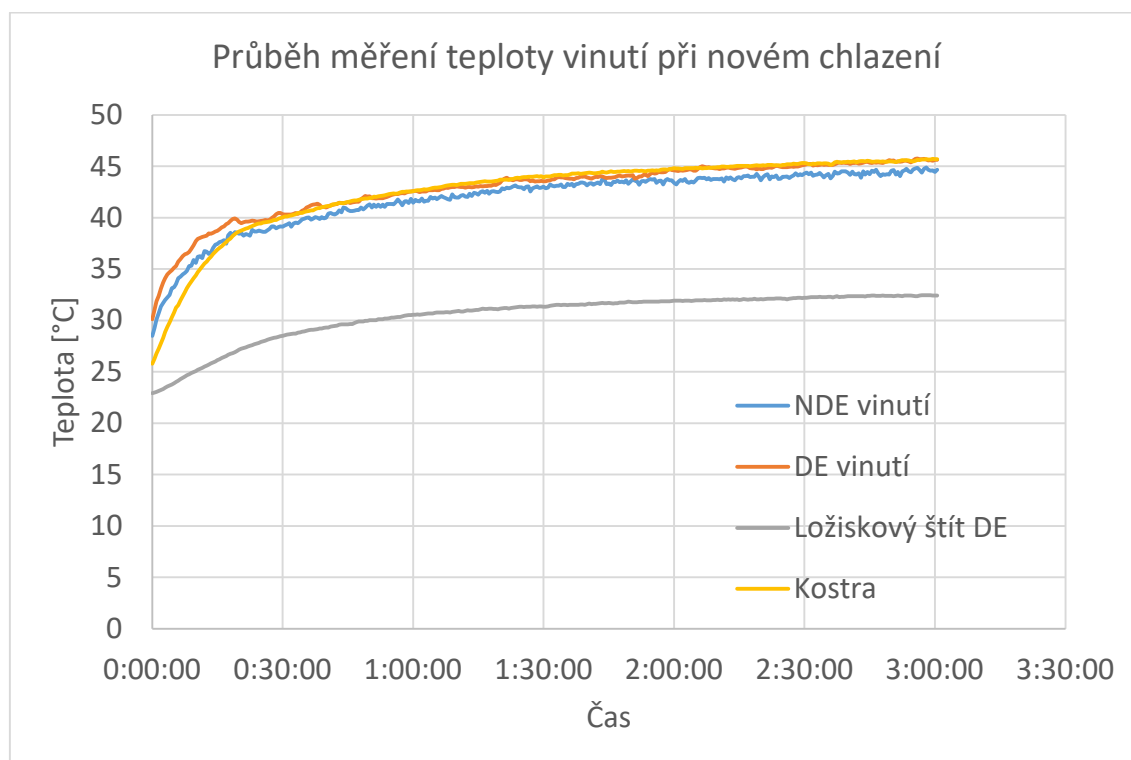
Prvně se lze podívat na průběh teplot z prvního měření na obrázku 22. Pro NDE a DE vinutí jsou hodnoty zprůměrovány ze čtyř PT článků na jedno čelo z důvodu přehlednosti grafu. Jak bylo napsáno výše v kapitole 4, pro urychlení zvýšení teploty ve vinutí byl zvýšen výkon dodávaný do stroje S1 a tím pádem i výkon vystupující ze stroje M1. To mělo za příčinu rychlejší náběh teplot v první části grafu. Tento nárůst je velmi dobře viditelný do doby 1:15:30. V tuto dobu došlo k snížení vstupního výkonu do frekvenčního měniče a došlo ke snížení nárůstu teploty ve vinutí. Mezi časy 1:15:30 a 2:01:30 dochází k teoreticky nepředpokládanému nárůstu teplot. Očekávali bychom logaritmický nárůst stejný, který je viditelný v první části. Je tomu tak z důvodu postupného zvyšování teploty okolí, která nebyla měřena. Měření probíhalo v poledních, až odpoledních hodinách. Zároveň se ve stejné místnosti měřil s pauzami jiný stroj. To mělo vše za následek kolísání okolní teploty. V čase 2:01:30 došlo k poslednímu měření jiného stroje a začala se teplota místnosti

ustalovat. Měření pak probíhalo do doby, než teplota vinutí nebyla změněna o  $\pm 1$  °C v poslední půlhodině.

Průběhy teplot NDE vinutí a DE vinutí byly průměrem čtyř získaných teplot z PT článků na každé straně stroje. Průběhy na ložiskovém štítu a kostry jsou výsledkem jednoho PT článku pro každý bod. Rozdíl v teplotách NDE a DE vinutí byl založen na typu chlazení stroje, se kterým byl vyroben. Jednalo se o uzavřený asynchronní stroj s chlazením vnějším ventilátorem na hřídeli. To mělo za následek lepší chlazení na NDE části stroje, kde byl umístěn ventilátor, a horší na DE části stroje. PT článek kostry mohl být ovlivněn prouděním vzduchu z ventilátoru. Skutečná teplota kostry mohla být vyšší.

Průměrné teploty na konci měření:

- NDE vinutí: 65,14 °C
- DE vinutí: 70,34 °C
- Ložiskový štít DE: 42,94 °C
- Kostra: 40,02 °C



Obr. 23: Průběh teploty vinutí druhého měření

Výsledné teploty zobrazené v grafu jsou v tomto případě průměry dvou PT článků oproti měření prvnímu. Je to z důvodu poruchy PT článků. Za poruchu mohlo chladící médium, které se mohlo dostat do oblasti odhalených přívodních vodičů PT článku. Ty byly sice

vloženy do silikonu a obaleny jím, mohlo ale dojít k jeho porušení vlivem ostříku chladicí kapaliny. Celková doba měření byla nižší, protože došlo k rychlejšímu ustálení teplot. Stejně jako v prvním případě, i zde byl zvýšen prvotní výkon, který urychlil oteplení vinutí na vyšší teplotu. V čase 0:17:30 došlo k nastavení vstupního výkonu na stejnou hodnotu, při které se odečítali teploty v prvním měření. Toto měření probíhalo v dopoledních hodinách a okolní teplota neměla téměř žádný vliv na průběh teplot. To bylo také způsobeno tím, že většina ztrát byla odvedena chladícím médiem, které nebylo tolik ovlivňováno okolní teplotou.

Z obrázku 23 lze na první pohled vidět nižší teploty než v případě originálního chlazení vnějším ventilátorem. Teploty na konci měření:

- NDE vinutí: 44,66 °C
- DE vinutí: 45,62 °C
- Ložiskový štít DE: 32,44 °C
- Kostra: 45,7 °C
- Teplota vstupního chladiva do stroje: 32 °C
- Výstupní hodnota chladiva ze stroje: 33,96 °C

Celkový rozdíl teplot prvního a druhého měření se pohyboval okolo 20 °C pro vinutí. Za zmínku stojí velmi podobná teplota vinutí DE a NDE strany. Protože docházelo k jejich rovnoměrnému chlazení, nebyl zde takový teplotní rozestup jako tomu bylo v případě prvního měření. Dále je vidět snížená teplota ložiskových štítů. Standardně vzduch uvnitř stroje funguje jako přestupové medium mezi čely vinutí a vnější kosterou a ložiskovými štíty, kudy je odváděno teplo ze stroje. V případě chlazení pomocí spray coolingu nedochází k takovému oteplení vzduchu uvnitř stroje. Dá se říct, že teplota ložiskových štítů je velmi podobná vstupní teplotě chladicí kapaliny do stroje. Jediná teplota, která byla vyšší v tomto případě, byla teplota kostry, protože nedocházelo k jejímu aktivnímu chlazení ventilátorem jako v prvním případě.

## **5.2 Výsledky třetího měření**

Toto měření probíhalo několik dní po prvních dvou měřeních. V tomto případě jsme se pokusili o napájení stroje M1, který byl předělaný na chlazení metodou spray cooling, frekvenčním měničem. Bohužel došlo při spuštění k aktivaci ochran.

Poté nebylo možné již motor znovu spustit.

## 6 Diskuse

Po měřeních lze říct, že metoda chlazení spray cooling snížila teplotu vinutí. Šlo ale pouze o prototyp celé soustavy. Je zde velký potenciál v dalším výzkumu, pro vylepšení celé této metody.

Největší nevýhodou byl velký rozměr celé sestavy, která byla momentálně objemnější než samotný stroj. Je tedy zřejmé, že zmenšení celého chladicího ústrojí je jedním z budoucích cílů.

Dostupné nevhodné trysky s rozstříkem  $120^\circ$  nepokryly celá čela vinutí. Testování jiných úhlů rozstříku samotných trysek, a i jejich umístění a typ, by bylo vhodné pro nalezení vhodné varianty. V našem případě nebylo využito všechno médium, které do stroje vteklo, na ochlazení vinutí statoru nebo rotoru. Je to vidět na obrázku 16, kdy velká část chladiva stříkala na ložiskový štít, po kterém stékala na dno stroje a odtékala pryč.

Další oblastí výzkumu by měla být chladicí média s ohledem na jejich chemické, tepelné a elektroizolační vlastnosti.

Také je potřeba zkoumání přetížitelnosti strojů se spray coolingem. V našem případě se jednalo o spárování dvou totožných strojů a nebylo tedy možné vyzkoušet přetížení zkoumaného stroje.

Poslední problematikou byl nedostatečný odčerpávací výkon membránových čerpadel, kvůli kterému nebylo možné využít potenciál trysek na maximum. Je potřeba použít čerpadla s vyšším průtočným množstvím, aby bylo možné zkoumat vliv průtočného množství na celkové ochlazení stroje.

I přes tyto nedokonalosti našeho měření se povedlo dokázat, že chlazení metodou spray cooling, je možné. Záleží ale na daných podmínkách a nese s sebou i nevýhody.

Je také potřeba nadále zkoumat důvody poruchy na stroji z třetího měření při napájení z frekvenčního měniče, aby se tomu dalo v budoucnu zabránit.

Také by bylo vhodné zkonstruování lepších labyrintů pro úplnou ochranu ložisek.



## 7 Zhodnocení a závěr

Spray cooling je aktivním typem chlazení, který odvádí ztráty přímo z jejich největšího zdroje – vinutí. Díky tomu dochází ke snížení teploty vinutí a zvýšení zatížitelnosti strojů, která je limitovaná maximální teplotou, pro kterou je izolace vinutí navrhována.

V našem případě došlo k potvrzení tohoto tvrzení, kdy se nám podařilo snížit teplotu vinutí při stejném zatížení stroje na NDE straně o 20,54 °C a na DE straně dokonce o 24,72 °C. Dále měl spraycooling pozitivní vliv na symetrizaci teploty čel vinutí a snížení teploty ložiskových štítů.

Vytvořené ústrojí pro rozvod chladicího média fungovalo a nevyskytly se zde žádné problémy. Membránová čerpadla dokázala úspěšně odvádět chladicí médium ze stroje i přes výskyt nečistot.

Při zkoušení napájení stroje M1 z frekvenčního měniče došlo v aktivaci ochran a průrazu izolace vinutí stroje. Kvůli tomu nebylo možné dále zkoušet jiná zatížení stroje.

## 8 Literatura

- [1] FOLEY, Aoife, Barry TYTHER, Patrick CALNAN and Brian Ó GALLACHÓIR, 2013. Impacts of Electric Vehicle charging under electricity market operations. *Applied Energy* [online]. 101, 93–102. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2012.06.052
- [2] GRONWALD, Peer-Ole and Thorsten A. KERN, 2021. Traction Motor Cooling Systems: A Literature Review and Comparative study. *IEEE Transactions on Transportation Electrification* [online]. 7(4), 2892–2913. Dostupné z: doi:10.1109/tte.2021.3075844
- [3] PARK, Myeong Hyeon and Sung Chul KIM, 2019. Thermal characteristics and effects of oil spray cooling on in-wheel motors in electric vehicles. *Applied Thermal Engineering* [online]. 152, 582–593. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2019.02.119
- [4] LIM, Dong Hyun and Sung Chul KIM, 2014. Thermal performance of oil spray cooling system for in-wheel motor in electric vehicles. *Applied Thermal Engineering* [online]. 63(2), 577–587. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2013.11.057
- [5] GARUD, Kunal Sandip and Moo-Yeon LEE, 2024. Thermal management characteristics of electric vehicle driving motor with oil spray cooling based on spray locations and oil types. *Applied Thermal Engineering* [online]. 123234. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2024.123234
- [6] DONG, Haihong, Lin RUAN, Yu WANG, Jie YANG, Feihui LIU and Shuqin GUO, 2021. Performance of air/spray cooling system for large-capacity and high-power-density motors. *Applied Thermal Engineering* [online]. 192, 116925. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2021.116925
- [7] WANG, X., B. LI, D. GERADA, K. HUANG, I. STONE, S. WORRALL and Y. YAN, 2022. A critical review on thermal management technologies for motors in electric cars. *Applied Thermal Engineering* [online]. 201, 117758. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2021.117758
- [8] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC). VDI Heat Atlas. Ebook. Druhé vydání. Springer. 2010. Dostupné z: <https://www.humsterlandenergie.nl/resources/livreHeatAtlas.pdf>

- [9] TOMÁŠKOVÁ, T; ČEJKOVÁ, A; HARVÁNEK, L. Vliv tepelných vlastností materiálu na elektroizolační systémy. [online]. Electroscope. Číslo 2. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/21477>
- [10] Anon., 2013. Exploring engineering. In: Elsevier eBooks [online]. Dostupné z: doi:10.1016/c2011-0-04445-9
- [11] SIKORA, Michal. Inovace systému chlazení točivých elektrických strojů s využitím CFD metod. Online, Disertační práce, vedoucí Ctirad Kratochvíl. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, 2011. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/6177>
- [12] DOERR, Joachim, Tobias ATTENSPERGER, Ludwig WITTMANN and Tobias ENZINGER, 2018. The New Electric Axle Drives from Audi. MTZ Worldwide [online]. 79(6), 18–25. Dostupné z: doi:10.1007/s38313-018-0042-4
- [13] ITO, Yuta, Tadanobu AOKI, Tomokazu NAITO and Toru HIRANISHI, 2019. Development of Motor with Heavy Rare Earth-Free Magnet for Two-Motor Hybrid System. SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility [online]. 1(3), 1169–1176. Dostupné z: doi:10.4271/2019-01-0600
- [14] GHAFHAROKHI, Payam Shams, Andrejs PODGORNOVS, Ants KALLASTE, Antonio J. Marques CARDOSO, Anouar BELAHCEN and Toomas VAIMANN, 2023. The oil spray cooling system of automotive traction motors: the state of the art. IEEE Transactions on Transportation Electrification [online]. 9(1), 428–451. Dostupné z: doi:10.1109/tte.2022.3189596
- [15] *HENNLICH s.r.o.* Online. Aktualizováno 2023. Dostupné z: <https://www.hennlich.cz/hydro-tech/trysky/>
- [16] BARTOŠ, Václav; SKALA, Bohumil. Měření na elektrických strojích. Druhé vydání. 2006. 80-7043-447-3.
- [17] VSK Profi, s.r.o. Online. Aktualizováno 2024. Dostupné z: <https://www.vsk-profily.cz/hlinikovy-profil-bh-40-10-40x40/>
- [18] *MatWeb, LLC.* Online. Aktualizováno 2024. Dostupné z: <https://www.matweb.com/errorUser.aspx?msgid=2&ckck=nocheck>
- [19] *MatWeb, LLC.* Online. Aktualizováno 2024. Dostupné z: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=0e37a459c4eb452faa9d92659f9a0ccc&ckck=1>