

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh vnější struktury
elektromotoru pro vůz Formula

Student

Tomáš Vrbata

Vedoucí: Ing. Lukáš Pacoň

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV AUTOMOBILŮ, SPALOVACÍCH MOTORŮ A
KOLEJOVÝCH VOZIDEL



10. července 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vrbata** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **475007**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh vnější struktury elektromotoru pro vůz Formula Student

Název bakalářské práce anglicky:

Design of external structure of electric motor for Formula Student car

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte rešerši kapalného chlazení elektromotorů v rámci soutěže Formula Student. Stanovte okrajové podmínky pro návrh vnější struktury elektromotoru pro vůz soutěže Formula student a popište výhody vlastního řešení. Vnější strukturu navrhnete a provedte CFD výpočet. Návrh a výpočet porovnejte s původním řešením z hlediska průtoku, odvedeného tepla, hmotnosti, ceny a výrobní náročnosti.

Seznam doporučené literatury:

Milliken, William F., and Douglas L. Milliken. Race Car Vehicle Dynamics. Warrendale, Pa: Society of Automotive Engineers, 1995.
Shoai Naini, S., Huang, J., Miller, R., Wagner, J. et al., 'An Innovative Electric Motor Cooling System for Hybrid Vehicles - Model and Test,' SAE Technical Paper 2019-01-1076, 2019
Bland, T. and Funke, K., 'ADVANCED COOLING FOR HIGH POWER ELECTRIC ACTUATORS,' SAE Technical Paper 921022, 1992

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lukáš Pacoň, ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **28.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.07.2020**

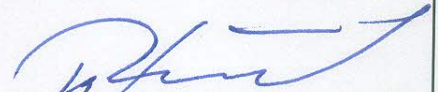
Platnost zadání bakalářské práce: _____



Ing. Lukáš Pacoň
podpis vedoucí(ho) práce



doc. Ing. Oldřich Vitek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Návrh vnější struktury elektromotoru pro vůz Formula Student vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze,

.....



Poděkování

Chtěl bych poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce za jeho konstruktivní rady a potřebnou kritiku práce. Velké poděkování patří firmě TG Drives za poskytnuté materiály k elektromotoru a firmě Techsoft Engineering za pomoc se simulacemi. Poslední poděkování patří členům týmu elektrické formule *eForce FEE Prague Formula*.



Anotační záznam

Jméno autora: Tomáš Vrbata

Název práce: Návrh vnější struktury elektromotoru pro vůz Formula Student

Anglický název: Design of external structure of electric motor for Formula Student car

Rozsah práce:

47 stran

30 obrázků

13 tabulek

Akademický rok: 2019/2020

Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Studijní program: Bakalářský - TZSI

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Paoň

Klíčová slova: Elektromotor, Ansys, Chlazení, Simulace, Průtok, Tlaková ztráta, Formula Student

Key words: Electric Motor, Ansys, Cooling, Simulations, Flow Rate, Formula Student, Pressure Loss



Abstrakt

Bakalářská práce se nejdříve zabývá současným řešením pohonného řetězce vozu týmu *eForce FEE Prague Formula*. Dále řeší chlazení motorů na vozech Formula Student Electric. V další části práce je proveden návrh zlepšení chlazení předních motorů na budoucí vůz formule. To spočívá ve vytvoření počítačového modelu motoru a návrhu různých chladících kanálů. Následně bude pomocí programu Ansys Fluent vybrán finální tvar chlazení na základě výsledků simulací.

Abstract

The bachelor's thesis first deals with the current solution of the drive chain of the *eForce FEE Prague Formula* team. It continues with research report of engine cooling on Formula Student Electric cars. In the next part of the work, a design is made to improve the cooling of the front engines for the future formula car. This consists of creating a computer model of the engine and designing various cooling ducts. Subsequently, the final cooling shape will be selected using the Ansys Fluent program based on the simulation results.



Obsah

I Seznam obrázků

II Seznam tabulek

III Seznam použitých veličin

1 Úvod	1
1.1 Cíle Bakalářské práce	1
1.2 Formula Student	1
1.3 Přední kolová zástavba	2
2 Teoretická část	5
2.1 Synchronní motory s permanentními magnety	5
2.1.1 Stator	5
2.1.2 Ztráty synchronních motorů	5
2.2 Chlazení	6
2.3 Chlazení elektromotorů	7
2.3.1 Pasivní chlazení	7
2.3.2 Nucené chlazení	7
2.4 Chlazení motorů elektromobilů	9
2.5 Třecí ztráty	10
3 Používané způsoby chlazení elektromotorů v soutěži Formula Student	13
3.1 Pravidla Formula student	13
3.2 Řešení ostatních týmů	13
4 Měření	16
4.1 Měření průtoku	16
5 Praktická část	19
5.1 Výchozí model	19
5.2 Nastavení simulace	19
5.3 Varianta 1	21
5.4 Varianta 2	24
5.5 Varianta 3	26
5.6 Varianta 4	28
5.7 Varianta 5	30
5.8 Výběr nejlepší varianty	32
5.9 Porovnání vybrané varianty s původní	33



6 Závěr

34

Seznam obrázků

1	Rozdělení bodů z jednotlivých disciplín	2
2	Řez přední kolovou zástavbou FSE08	3
3	Přední kolová zástavba FSE08	4
4	Kostra motoru s chladicí drážkou	4
5	Chlazení vzduchem - uzavřený typ [1]	8
6	Chlazení motoru pomocí tzv. mokrého statoru [1]	9
7	Chlazení rotorové části [1]	9
8	Motor z vozidla Nissan Leaf [2]	10
9	Chlazení motoru Audi e-tron [3]	11
10	Moodyho diagram [4]	12
11	Integrované chlazení motoru do těhlice (AMZ 2019) [5]	14
12	Chlazení motoru (ETSEIB 2019) [6]	14
13	Chladicí plášť s pilířovitou strukturou (TUfast 2018) [7]	15
14	Schéma měření průtoku na předním motoru	16
15	Měření průtoku předního motoru	17
16	Ultrazvukový průtokoměr použitý pro měření	18
17	Odečítání tlaku z charakteristiky čerpadla při známém průtoku vody [8]	18
18	Objemová síť v Ansys Fluent	20
19	Ustálení výsledku simulace	21
20	Varianta 1- současné řešení na předních motorech	22
21	Varianta 1 - teplota vody a povrchu kostry	23
22	Varianta 2	24
23	Varianta 2 - teplota vody a povrchu kostry	25
24	Varianta 3	26
25	Varianta 3 - teplota vody a povrchu kostry	27
26	Varianta 4	28
27	Varianta 4 - teplota vody a povrchu kostry	29
28	Varianta 5	30
29	Varianta 5 - teplota vody a povrchu kostry	31
30	Porovnání nové a původní varianty	33



Seznam tabulek

1	Měření průtoku	17
2	Varianta 1	22
3	Varianta 1 - Teploty komponent	22
4	Varianta 1 - závislost sledovaných hodnot na průtoku	23
5	Varianta 2	24
6	Varianta 2 - Teploty komponent	25
7	Varianta 3	26
8	Varianta 3 - Teploty komponent	27
9	Varianta 4	28
10	Varianta 4 - Teploty komponent	29
11	Varianta 5	31
12	Varianta 5 - Teploty komponent	31
13	Porovnání nové a původní varianty	33



Seznam použitých veličin

Symbol	Jednotky	Význam
P_e	[W]	Ztráty vířivými proudy
P_h	[W]	Hysterezní ztráty
K_E	[-]	Konstanta vířivých proudů
B	[Wb/m ²]	Hustota magnetického toku
f	[Hz]	Frekvence
t	[m]	Tloušťka materiálu
V	[m ³]	Objem
S_s	[m ²]	Plocha hysterezní smyčky
T	[°C]	Teplota
T_w	[°C]	Teplota stěny
T_0	[°C]	Teplota okolí
α	[W/m ² K]	Součinitel přestupu tepla
λ	[W/mK]	Tepelná vodivost
L_{char}	[m]	Charakteristický rozměr
ρ	[kg/m ³]	Hustota
H_c	[A/m]	Koercivita
Re	[1]	Reynoldsovo číslo
Nu	[1]	Nusseltovo číslo
Pr	[1]	Prandtlovo číslo
Ga	[1]	Grashofovo číslo
Δp	[Pa]	Tlaková ztráta
λ_t	[1]	Součinitel třecích ztrát
L_k	[m]	Délka kanálu
D_h	[m ²]	Hydraulický průměr
v	[m/s]	Rychlost proudění vody
A_k	[m]	Výška kanálu
B_k	[m]	Šířka kanálu
S_k	[m ²]	Průřez kanálu
\dot{V}	[m ³ /s]	Průtok
ν	[m ² s ⁻¹]	Kinematická viskozita
\dot{Q}	[W]	Tepelný výkon
\dot{m}	[kg/s]	Hmotnostní tok
m	[kg]	Hmotnost
c	[J · kg ⁻¹ K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita



1 Úvod

1.1 Cíle Bakalářské práce

Z důvodu přehřívání předních motorů na vozech týmu studentské elektrické formule eForce FEE Prague Formula jsem se rozhodl pro návrh vlastního chlazení těchto motorů. Cílem práce je navrhnutí krytu s integrovaným chlazením tak, aby se zlepšila účinnost chlazení a zvýšil se průtok chladicí kapaliny tj. snížení tlakové ztráty a zlepšení přestupu tepla mezi kostrou motoru a jeho krytem. Prvním krokem této práce je získání potřebných dat od firmy TGDives, od které máme motory, dále změření průtoku na předním chladícím okruhu a následné vytvoření funkčního modelu v simulačním programu Ansys Fluent. S tímto úkolem mi pomůže firma Techsoft Engineering, která se specializuje na programy od této firmy. Po zprovoznění modelu bude následovat návrh několika typů chladících kanálů a jejich následná simulace a nakonec výběr nejlepší varianty.

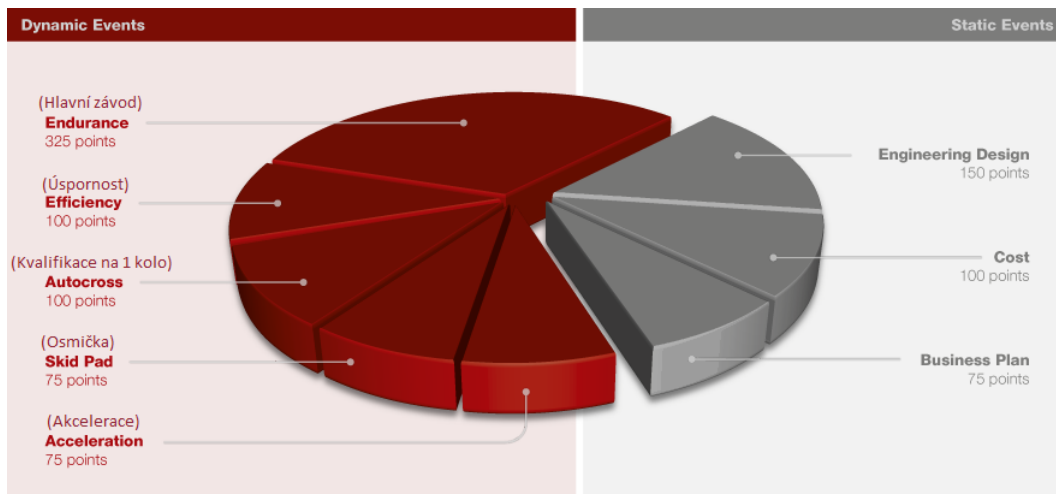
1.2 Formula Student

Formula Student je celosvětová inženýrská soutěž pro studentské týmy z vysokých škol. První ročník soutěže se odehrál v roce 1980 ve Spojených státech amerických za účelem praxe studentů pro automobilový průmysl. Současné době existuje více soutěží s lehce pozměněnými pravidly, jako například Formula Student Germany. Úkolem týmu je každý rok postavit vůz formulového typu podle pravidel a poté se s ním účastnit mezinárodních závodů. Až do roku 2010 se soutěžilo v jediné kategorii, a to s vozidlem se spalovacím motorem (CV - Combustion Vehicles). V roce 2010 se soutěž rozšířila o formule s čistě elektrickým pohonem (EV - Electric Vehicles) a od roku 2017 o Driverless kategorii, kde musí formule, ať elektrická, či spalovací, odjet určité disciplíny bez řidiče jen pomocí autonomních technologií. Na soutěžích jsou dva typy disciplín; tzv. statické a dynamické. Za každou z nich je určitý bodový zisk a součet všech bodů je 1000.

Mezi statické disciplíny patří Engineering Design Report, kde tým před porotou, která je nejčastěji složená z odborníků z automobilové průmyslu a motorsportu, prezentuje svá technická řešení, která použil při návrhu a následně si je snaží obhájit. Druhou disciplínou je Cost Report, kde se naceňuje vůz při fiktivní sérii 1000 kusů a obsahuje podrobný kusovník celého vozu. Dále se vypracovávají různé studie, například ekologičnost elektroauta nebo recyklace baterek. Poslední disciplínou je Business Plan, kde se komisi představuje plán prodeje formule obsahující finanční investice apod.

Při dynamických disciplínách se hodnotí kvalita vozu, respektive čas na technicky

různorodých tratích. První z nich je Akcelerace, kde se hodnotí sprint na 75 m. Druhou disciplínou je Skid Pad, při kterém se jezdí na trati osmičkového tvaru o středním průměru kola 18,25 m. Třetí disciplínou je Autocross, jedná se o silně technickou trať dlouho necelý kilometr. Dle pravidel je maximální délka rovného úseku 80 m a maximální poloměr zatáčky 25 m. Na lehce upravené autocrossové trati se jede hlavní závod Endurance s celkovou délkou 22 km, na kterém bývá otestována kvalita vozů a také jezdecká kvalita a vytrvalost pilotů, kteří se mění v polovině závodu. Poslední disciplínou je Fuel Efficiency, neboli hodnocení spotřeby energie při Endurance. U spalovacích formulí se hodnotí objem spotřebovaného paliva a u elektrických se měří proud a napětí odebrané z akumulátoru a z toho se následně spočítá celková spotřebovaná energie. Nehodnotí se čistě spotřeba, ale poměr ku dosaženému času, tak aby nevyhrál tým s extrémně pomalou a úspornou jízdou. [9]



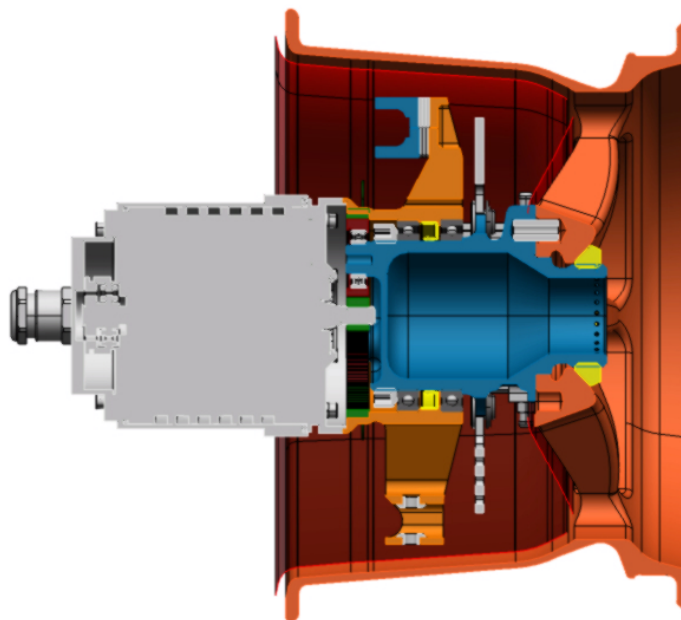
Obrázek 1: Rozdělení bodů z jednotlivých disciplín [10]

1.3 Přední kolová zástavba

Na přední nápravě vozu jsou použita dvojitá A-ramena z chrommolybdenové oceli nestejně délky, ke kterým je pomocí kloubových hlavic připevněna těhlice. K té je pomocí čtyř šroubů přichycen přední motor. V těhlici je ve dvou ložiscích s kosoúhlým stykem usazen náboj, na kterém je z jedné strany upevněn brzdový kotouč a čepy, na které se nasazuje kolo a druhá strana slouží jako unašec planetové převodovky, na kterém jsou nasazena planetová kola jednostupňové planetové převodovky s převodovým poměrem $i = 6,95$, která slouží k převodování otáček motoru do pomala a zvýšení kroutícího momentu kola. Koruna převodovky je nalisovaná v těhlici a pastorek je na výstupní hřídeli elektromotoru.

O chlazení vozu se starají dva, na sobě nezávislé, vodní okruhy. Na každém z nich je nainstalovaný chladič od firmy Hanon Systems o maximálním výkonu 4kW, které

jsou umístěny v bočních křídlech. O pohon chlazení se starají 2 vodní pumpy DC40 od firmy Vovyo s udávaným maximálním průtokem 10 l/min, ale z důvodů výrazné tlakové ztráty je průtok na předním okruhu pouze 2,4 l/min. Na předním okruhu jsou napojeny oba frekvenční měniče a přední motory. Zadní okruh se stará pouze o chlazení zadních motorů z důvodu jejich velkého ztrátového výkonu v podobě tepla. [8]

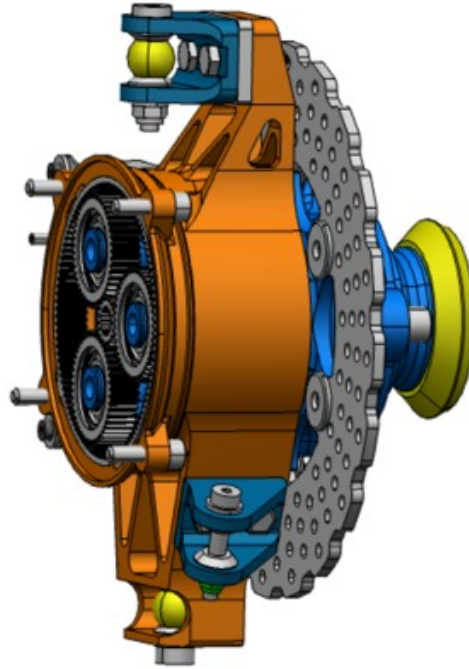


Obrázek 2: Řez přední kolovou zástavbou FSE08

Již od druhého monopostu používáme motory od brněnské firmy TG Drives. Ta nám nejdříve dodávala pomaloběžné synchronní motory, které poháněly pouze zadní kola. Pro sezonu 2015 byla navržena nová přední kolová zástavba mým předchůdcem Ing. Petrem Sucháčkem, která umožnila umístění nových vysokotáčkových synchronních motorů od téže firmy do předních kol a tím vznikla první pražská formule s náhonem na všechna čtyři kola.

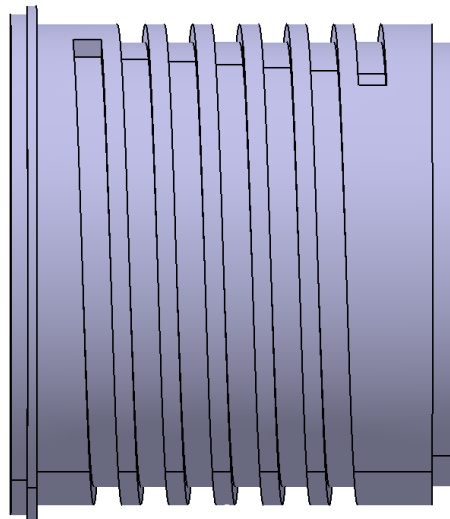
Firma TG Drives se specializuje na servopohony pro stroje a zařízení v průmyslové automatizaci. Pro naše potřeby pouze upravuje jejich servopohony dle požadavků, které jim každý rok pošleme. Zejména se jedná o změnu statorového vinutí, které je uzpůsobeno vyšším otáčkám. Pro zlepšení odvodu tepla je celé zalito v teplovodivé pastě. Dále se jedná o změnu vnějšího hliníkové pláště a příruby tak, aby bylo možné motory upevnit do vozidla.

Na přední nápravě již druhým rokem používáme upravené motory TGM4 s maximálními otáčkami 9000 min^{-1} a maximálním výkonem 8,7 kW. Jsou to desetipólové motory s aktivní zónou vinutí dlouhou 60 mm a se statorovými plechy o tloušťce 0,35 mm. Chlazení je řešeno pomocí šroubovicové drážky v osově délce 60 mm v kostře motoru, kterou můžete vidět na Obr. 4, a přes ni je pak nasazen vnější hliníkový plášť.



Obrázek 3: Přední kolová zástavba FSE08

Maximální povolená teplota na rotoru je 110 °C, po překročení této teploty začne docházet k odmagnetování magnetů a k jejich trvalému znehodnocení. Avšak jediné teplotní čidlo je umístěno na konci statorového vinutí, tím pádem nedokážeme určit teplotu rotoru. Z důvodu špatného přestupu tepla na chladicí kapalinu se motory nedokáží uchlazen a dochází k častému přehřívání, a z toho důvodu je nemůžeme při disciplínách AutoX a Endurance zatěžovat na potřebný výkon.



Obrázek 4: Kostra motoru s chladicí drážkou



2 Teoretická část

2.1 Synchronní motory s permanentními magnety

Synchronní motory s permanentními magnety (PMSM) jsou elektrické točivé stroje, které mají stejnou rychlost otáčení rotoru, jako je rychlost otáčení magnetického pole statoru, které je generováno přivedením sinusového proudu do trojfázového vinutí statoru. K vytvoření trvalého magnetického pole rotoru jsou použity permanentní magnety s příměsí vzácných zemin jako je například neodym. Magnety jsou nejčastěji tvořeny směsí železa, kobaltu, neodymu. Tímto principem jsou motory buzeny a odpadá nutnost použití budícího vinutí, jako se používá u asynchronních motorů. Díky tomu jsou synchronní motory s permanentními motory účinnější a menší než motory asynchronní.

2.1.1 Stator

Stator je tvořen izolovanými elektrotechnickými plechy o tloušťce v řádu desetin milimetru. V nich jsou vyřezané drážky, kterými vede třífázové vinutí, které je tvořeno čistou elektrotechnickou mědí z důvodů minimalizování ztrát. U vysokootáčkových synchronních motorů se používá koncentrované vinutí, kde je vždy cívka navinuta kolem jednoho zářezu na statoru. Čela vinutí a vinutí v drážkách může být zalito teplovodivou pastou pro lepší odvod ztrátového tepla z oblasti statorových plechů. [11]

2.1.2 Ztráty synchronních motorů

Elektrický motor přeměňuje elektrickou energii na mechanickou, a přitom vznikají ztráty, které lze rozdělit na elektrické, mezi které patří Joulovy ztráty na vinutí, které jsou úměrné odporu vodiče a kvadrátu protékajícího proudu. Dále na magnetické, mezi ně patří hysterezní ztráty:

$$Ph = fS_sV \quad (1)$$

statorových plechů způsobené magnetizací a demagnetizací plechů protékajícím střídavým proudem.

Dále vířivé ztráty, které jsou výsledkem Faradayova zákona: *"Změnou magnetického pole v okolí cívky se v cívce indukuje el. napětí a v uzavřeném obvodu prochází indukovaný proud. Směr proudu je závislý na směru změny magnetického pole a na orientaci pólů magnetu vůči cívce."* Tedy, když magnetické pole rotuje skrze statorové plechy, napětí nebo elektromotorické napětí se indukuje ve vinutí, které způsobuje danou ztrátu.

$$P_e = K_e B_{max}^2 f^2 t^2 V \quad (2)$$

Jak již bylo zmíněno, stator je složen z mnoha tenkých plechů, protože odpor jednotlivých plechů je menší, než kdyby se použil jeden tlustý. Tento nižší odpor snižuje vířivé proudy a tím i jejich ztráty vířivými proudy. Plechy jsou opatřeny ochranným povlakem, který zamezuje „přeskakování“ těchto proudů z jednoho plechu na druhý. [12]

2.2 Chlazení

Z fyzikální zákonitosti existují tři základní druhy sdílení tepla:

a) vedením, neboli kondukcí – je přenos vnitřní tepelné energie pomocí srážek mikroskopických částic, kterými mohou být molekuly nebo atomy, a pohybu elektronů uvnitř tělesa. Zákon kondukce, neboli Fourierův zákon:

$$\dot{q} = -\lambda \nabla T \quad (3)$$

říká, že vektor hustoty tepelného toku q je úměrný gradientu teploty ∇T a má opačný směr, a kde λ je teplotní vodivost. Jedná se o materiálovou vlastnost, která udává, jak dobře daný materiál dokáže vést teplo.

b) prouděním, též konvekcí – jedná se o sdílení tepla makroskopickým pohybem tekutiny. Vzniká na povrchu tělesa, které je v kontaktu s okolní tekutinou, která se ohřívá a odvádí energii od zdroje tepla. Konvekce existuje právě tehdy, když je rozdílná teplota mezi tekutinou a povrchem tělesa. Pokud je proudění tekutiny vyvoláno uměle, například čerpáním, pak mluvíme o tzv. konvekci vynucené. Sdílení tepla prouděním je popsáno Newtonovým ochlazovacím zákonem:

$$\dot{q} = \alpha(T_w - T_0) \quad (4)$$

kde α je součinitel přestupu tepla, který závisí na všech proměnných, které působí v okolí povrchu tělesa. Například charakteristický délkový rozměr L_{char} (m) systému nebo hustota tekutiny ρ (kg/m^3).

c) zářením, neboli radiací – teplo se v tomto případě šíří pomocí teplotního záření. Hmotný objekt zahřátý na termodynamickou teplotu (K) emituje část své vnitřní energie na energii elektromagnetických vln. Na rozdíl od dvou předchozích způsobů se může teplo prostřednictvím záření přenášet i ve vakuu. Při dopadu na jiné těleso se část energie elektromagnetických vln přemění zpět na vnitřní energii tohoto tělesa. [13] [14]

2.3 Chlazení elektromotorů

Při provozu elektromotory generují teplo z důvodu elektromagnetických, mechanických a elektrických ztrát na různých komponentech motoru. Pomocí kondukce a konvekce je teplo odváděno do chladicího média na principu tepelného spádu. Motory je nutné chladit, protože vysoká teplota negativně ovlivňuje jeho vlastnosti. Například s rostoucí teplotou klesá koercivita $H_c[A/m]$ permanentního magnetu. Jedná se o míru odolnosti magnetu proti demagnetizování. Také ztráty v mědi jsou teplotně závislé, protože rezistivita mědi se silně mění v závislosti na teplotě. [15]

V současné době existuje několik možností, jak chladit motory. Jejich využitelnost závisí na velikosti a výkonu motorů. Můžeme je rozdělit na pasivní a nucené chlazení.

2.3.1 Pasivní chlazení

Pasivní chlazení funguje na principu přirozené konvekce. Nusseltovo číslo Nu [1], nutné pro výpočet součinitele přestupu tepla $\alpha[W/m^2K]$, je závislé na Prandtlově Pr [1] a Grashofově čísle Gr [1]. Tento způsob se používá jen u málo a středně výkonných motorů. Skříň motoru je hlavní část, přes kterou je odváděno teplo z vnitřních komponent do okolního prostředí. Pro zlepšení odvodu tepla se na jeho povrch přidává žebrování, které zvětšuje jeho plochu, která je v kontaktu s okolním prostředím.

2.3.2 Nucené chlazení

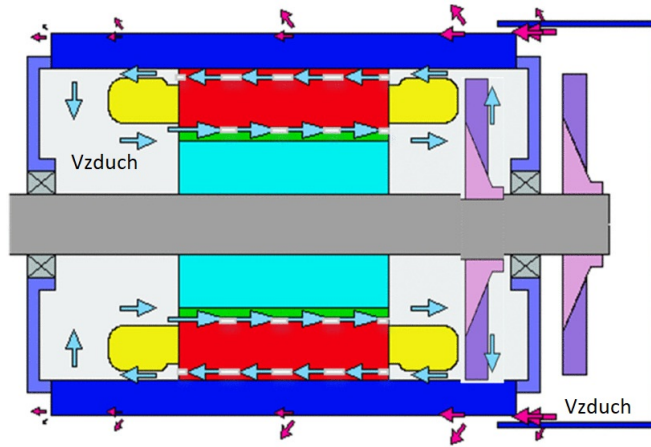
Jedná se o populárnější způsob chlazení, protože na trhu se objevují menší motory s vyšším poměrem výkonu k velikosti. Na rozdíl od pasivního způsobu se používá externí přístroj nebo zdroj energie k vytvoření potřebného proudění chladiva pro odvod tepla. Ke zjištění režimu proudění se používá Reynoldsovo číslo Re [1], na kterém dále společně s číslem Prandtlovým závisí součinitel přestupu tepla.

Nucené chlazení vzduchem

Kontinuální proudění vzduchu skrz motor nebo kolem něj zajišťuje ventilátor. Jeho účinnost silně závisí na kontaktní ploše, proto se často do rotoru a statoru dělají kanály, kterými může proudit vzduch. V závislosti na uzavřenosti motoru je možné tento typ chlazení rozdělit na uzavřený a otevřený.

U uzavřeného typu, který můžete vidět na Obr. 5, jsou dva okruhy, kde proudí vzduch, první je uvnitř motoru a druhý vně. Vzduch proudící uvnitř odvádí teplo z vnitřních částí motoru do skříně, kolem které proudí vzduch a odvádí teplo do okolí. Klíčovou výhodou tohoto typu je, že vnitřní části jsou chráněny před vnějším znečištěním. Pro zlepšení přestupu tepla a ke snížení odporové síly je možné ve vnitřním

prostoru použít vodík, protože má mnohem nižší hustotu než vzduch, ale zároveň má více jak 10x vyšší měrnou tepelnou kapacitu.



Obrázek 5: Chlazení vzduchem - uzavřený typ [1]

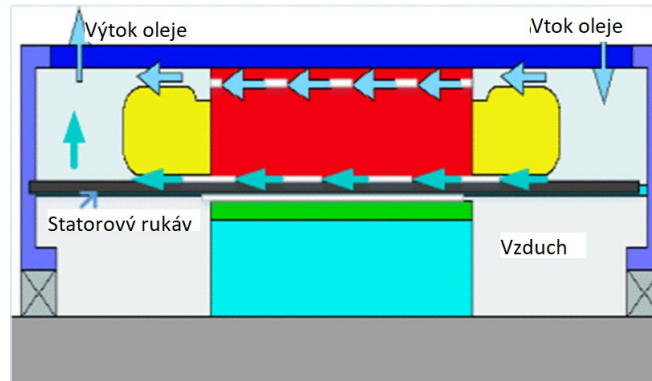
U otevřeného typu proudí vzduch z okolního prostředí přímo do motoru. Hlavní nevýhodou je znečišťování vnitřku motoru prachem apod., proto se motory musí po nějaké době rozebrat a vyčistit.

Nucené chlazení kapalinou

Jako chladicí médium se nejčastěji používá voda z důvodu vysoké tepelné kapacity. Dále se používá olej nebo směs vody a etylenglykolu (WEG). Kapalinné chlazení se nejčastěji používá u výkonných motorů, kde tuto funkci nedokáže splnit chlazení vzduchem.

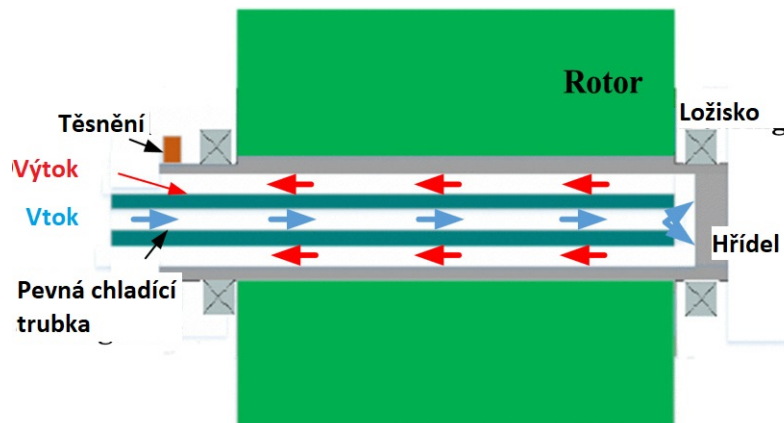
Chlazení pomocí kapaliny proudící pláštěm motoru je nejběžnější varianta. Drážka, kterou proudí chladicí médium je buď v kostře motoru, která je nejčastěji z hliníku a dobře vede teplo a ta je překryta pláštěm nebo může být hladká kostra a drážka je v plášti motoru. Teplo z motoru se kondukčně odvádí do kostry, které je následně konvekčně odvedeno chladicím médiem. Chlazení pláštěm je účinné při odvodu tepla ze statoru, ale nedostatečné pro disipaci tepla z konců vinutí a rotoru z důvodu vysokého teplotního odporu mezi zdrojem tepla a chladivem.

Další možností kapalinného chlazení je pomocí otvorů ve statoru, a to buď v plechách nebo v drážkách pro vinutí. Výhodou tohoto způsobu je, že se chladivo dostane blíže ke zdroji tepla a tím se sníží tepelný odpor, ale na druhou stranu může dojít k narušení magnetického toku. V praxi se také občas používá tzv. mokřý stator. Při něm je celá statorová část motoru ponořena v chladicím médiu, nejčastěji v hydraulickém oleji, který dále proudí ven, do chladiče a pumpy. Statorová část je izolovaná od vzduchové mezery a rotoru, aby nedocházelo k odporové ztrátě třením.



Obrázek 6: Chlazení motoru pomocí tzv. mokrého statoru [1]

Poslední možností je chlazení rotoru. Jelikož se jedná o rotační součást, je tento způsob nejsložitější na výrobu. Používá se dutá hřídel, ve která je nepohyblivá trubka, kterou proudí studená kapalina na druhý konec hřídele, a která se následně vrací mezi kružím ven z hřídele. [1] [14]

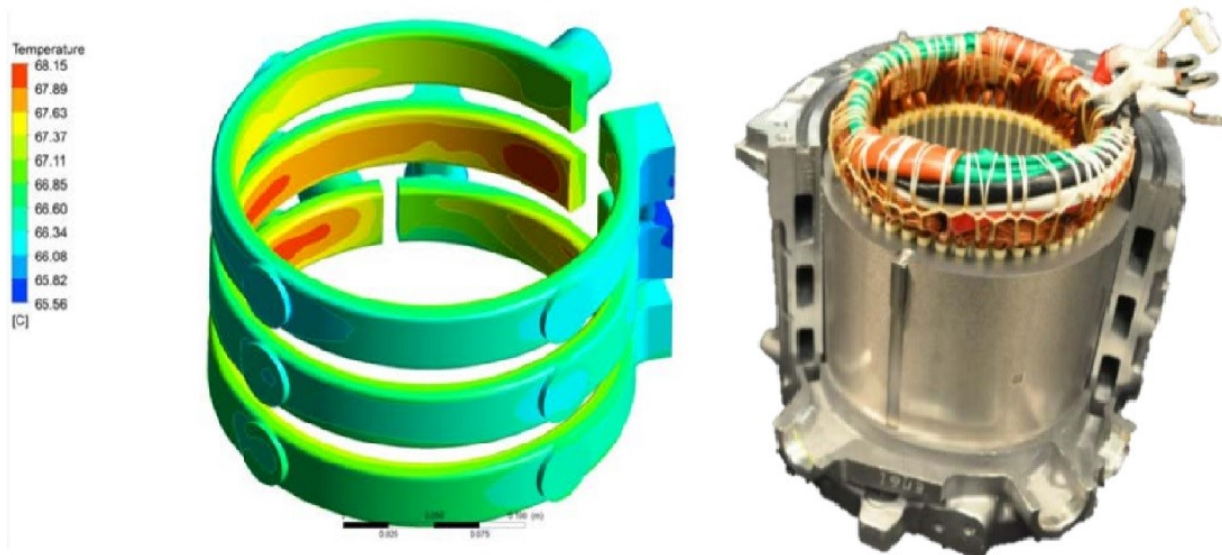


Obrázek 7: Chlazení rotorové části [1]

2.4 Chlazení motorů elektromobilů

Nissan LEAF

Ve vozidle Nissan LEAF je použitý synchronní motor s permanentními magnety o maximálním výkonu 80 kW. Plášť s chlazením, který je vyrobený z hliníku, obsahuje tři poměrně velké chladicí kanály, které jsou přibližně 35 mm široké a 12,5 mm vysoké. Plášť má vnitřní průměr přibližně 200 mm a vnější průměr 250 mm a jeho osové délka je 210 mm a jeho hmotnost se pohybuje okolo 10 kg. Jako chladicí médium se používá roztok vody a etylenglykolu (WEG). [2]



Obrázek 8: Motor z vozidla Nissan Leaf [2]

Audi e-tron

Ve vozidle jsou použité dva asynchronní motory o výkonu 125 kW a 140 kW. Chlazení motoru je zajištěné pomocí vodního chlazení. Na každý motor připadá jeden chladicí okruh, který zajišťuje chlazení výkonové elektroniky. Dále prochází dutou částí hřídele a chladicí drážkou příruby motoru, která slouží pro chlazení čela rotoru. Poté pokračuje do chladicích kanálů v plášti motoru zajišťující chlazení statoru, a nakonec do druhé příruby motoru. [16]

2.5 Třecí ztráty

Třecí ztráty v v potrubí jsou jednak závislé na vlastnostech protékané tekutiny (na hustotě, viskozitě), dále na potrubí (jeho délce, průměru, drsnosti). Při výpočtu této ztráty se nejčastěji počítá s Weisbachovým vzorcem:

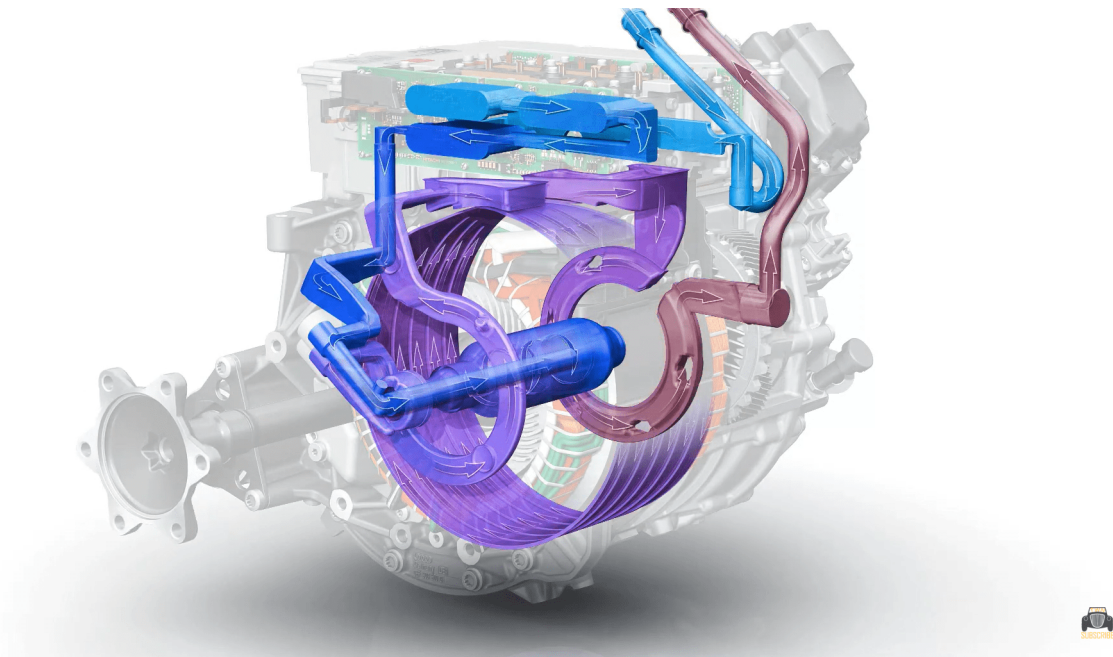
$$\Delta p = \lambda_t \frac{\rho L_k v^2}{D_h} \frac{1}{2} \quad (5)$$

kde $\lambda_t[1]$ je součinitel třecích ztrát, $\rho[kg \cdot m^{-3}]$ hustota kapaliny, $L_k [m]$ délka kanálu, $D_h[m^2]$ hydraulický průměr a $v[m \cdot s^{-1}]$ rychlost proudění vody.

Hydraulický průměr kanálu pro obdélníkový průřez potrubí:

$$D_h = \frac{4 \cdot A_k \cdot B_K}{2 \cdot (A_K + B_k)} \quad (6)$$

kde $A_K [m]$ je výška a $B_K [m]$ šířka kanálu.



Obrázek 9: Chlazení motoru Audi e-tron [3]

Z průřezu $S_k[m^2]$ a objemového průtoku vody $\dot{V}[m^3s^{-1}]$ se spočítá rychlost proudění:

$$v = \frac{\dot{V}}{S_k} \quad (7)$$

Dále je nutné spočítat Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{v \cdot D_h}{\nu} \quad (8)$$

kde $\nu[m^2s^{-1}]$ je kinematická viskozita kapaliny.

Součinitel třecích ztrát

Při výpočtu součinitele třecích ztrát je nejprve nutné zjistit druh proudění, které rozlišujeme na laminární a turbulentní. Jako hodnotící kritérium se využívá Reynoldsovo číslo Re (8). Je-li Reynoldsovo číslo menší než jeho kritická hodnota Re_k , tak se jedná o laminární proudění. Pro proudění v trubici kruhového průřezu je $Re_k = 2300$. Při překročení této kritické hodnoty se stává z laminárního proudění turbulentní. Hodnotu součinitele třecích ztrát je možné odečíst z tzv. Moodyho diagramu, který zobrazuje závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle a relativní drsnosti potrubí.

Při výpočtu v oblasti laminárního proudění je součinitel třecích ztrát přímo úměrný Reynoldsovu číslu a vypočítá se z Poiseuillova vztahu:

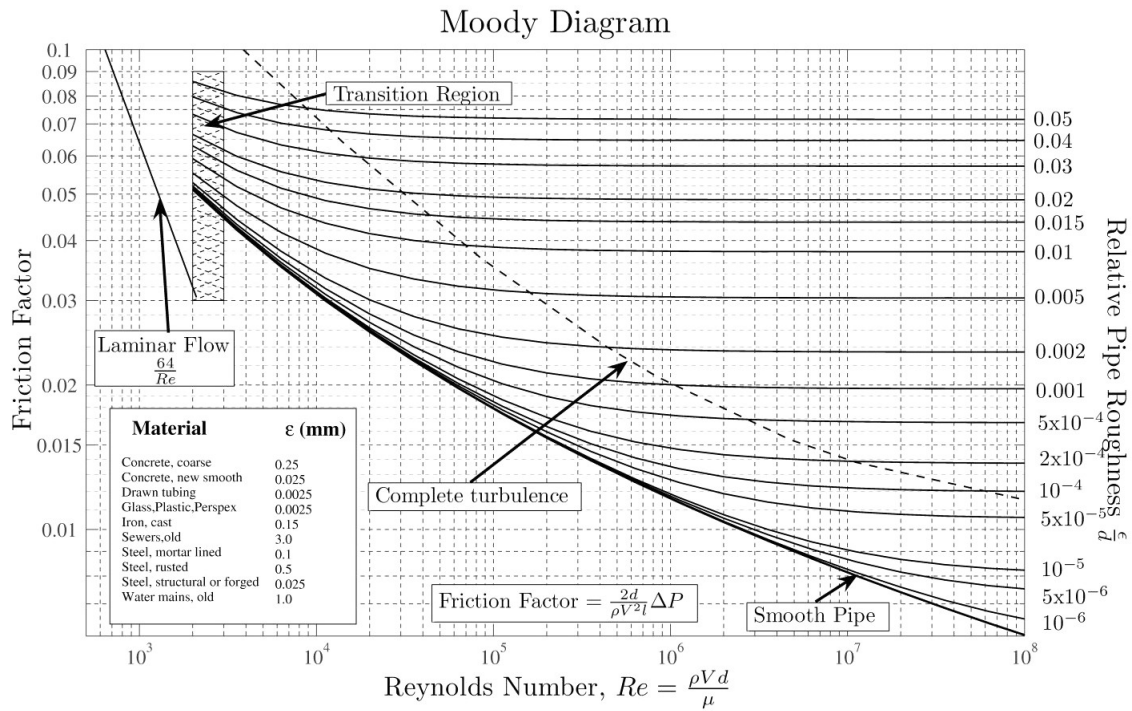
$$\lambda_t = \frac{64}{Re} \quad (9)$$

Třecí ztráty v laminárním proudění vznikají při přenosu hybnosti tekutiny ze středu

proudění na stěnu potrubí pomocí viskozity tekutiny. Součinitel třecích ztrát není závislý na drsnosti potrubí, protože při laminárním proudění je rychlost tekutiny na stěně nulová. [17] [18]

Při výpočtu součinitele v turbulentní oblasti již závisí na drsnosti potrubí. Pro hydraulicky hladké potrubí pro $Re < 80000$ se používá Blaisův vztah:

$$\lambda_t = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \quad (10)$$



Obrázek 10: Moodyho diagram [4]



3 Používané způsoby chlazení elektromotorů v soutěži Formula Student

3.1 Pravidla Formula student

Dle pravidel soutěže se smí komponenty trakčního systému (TS components) chladit jen pomocí čisté vody nebo oleje, tím pádem nejde použít směs vody a etylenglykolu, tak jako se využívá v automobilovém průmyslu. Všechny části auta, které jsou v kontaktu s chladicí kapalinou musí být teplotně odolné a hadice, hadicové spojky apod. musí být certifikované minimálně na teplotu 120 °C. Rotační části hnacího ústrojí, v případě elektroformulí se to týká elektromotorů, musí obsahovat kryt z oceli o tloušťce 2 mm nebo z hliníkové slitiny 6061-T6 o tloušťce 3mm. [9]

3.2 Řešení ostatních týmů

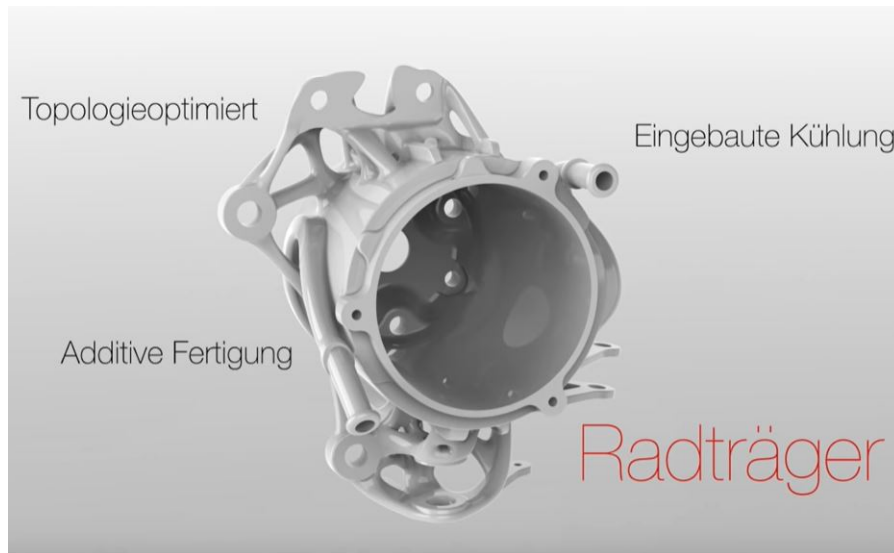
AMZ racing

Tým AMZ racing z univerzity ve švýcarském Curychu patří po mnoho let ke světové špičce v soutěži Formula student Electric. Tým byl založen v roce 2006, kdy se nejdříve věnoval stavbě formule se spalovacím motorem, ale od roku 2010 začal vyvíjet vozy s elektrickým pohonem a od roku 2017 závodí i v kategorii Driverless. Jejich poslední elektrický vůz Mythen, ze sezóny 2019, váží pouze 162 kg a k pohonu využívá čtyř stejných nábojových synchronních motorů s permanentními magnety vlastního návrhu a výroby o výkonu 37kW.

Na obrázku Obr. 11 je zobrazena těhlice jejich posledního vozu, ve které je integrován chladicí okruh pro vodní chlazení motoru. Těhlice je navrhnutá s pomocí topologické optimalizace a vyrobena sintrováním z hliníku. Na závodech bylo vidět, že mezi samotný motor a těhlici dávají určitý typ teplovodivé pasty pro lepší přestup tepla, ale nepovedlo se mi zjistit, co to přesně je. [19]

ETSEIB Motorsport

Tým z univerzity v Barceloně je v současné době nejlepším španělským týmem. Byl založen v roce 2007 a jako většina ostatních týmů se zprvu věnoval stavbě spalovací formule. Pro sezónu 2019 postavili již jejich dvanácté auto s názvem CAT12e, ale jedná se o jejich první vůz, který má v každém kole zastavěný motor. Použili synchronní elektromotory s permanentními magnety od německé firmy Fischer, které se chlubí výkonem 35 kW při hmotnosti necelých tří kilogramů (bez vnějšího krytu) a až s 96% účinností, ale i tak mají při maximální zátěži celkový ztrátový výkon přibližně 2150 W.



Obrázek 11: Integrované chlazení motoru do těhlice (AMZ 2019) [5]

Tým ETSEIB si nechal vyfrézovat chladicí kanál do kostry motoru a vnější kryt si nechal vyrobit 3D tiskem, jak můžete vidět na Obr. 12. [20]



Obrázek 12: Chlazení motoru (ETSEIB 2019) [6]

TUfast Racing Team

TUfast Racing Team z německého Mnichova je v současné době nejlepší elektrický tým soutěže. V sezóně 2019 se stali celkovými vítězi všech závodů, kterých se zúčastnili. Jejich formuli pohání čtveřice elektromotorů vlastní výroby o přibližném výkonu 35 kW. O chlazení se stará jeden vodní okruh s dvěma chladiči umístěnými na difuzoru, kterými proudí vzduch z pod auta. Předchozí sezóny řešili chlazení elektromotorů pomocí vyfrézovaného vodního kanálu v krytu motoru. V roce 2018 vyvinuli vlastní kryt

vyrobený sintrováním hliníkové slitiny, do kterého je vlisován stator. Chladicí kanál je řešený jako jedna velká dutina, ve které je mnoho pilířovitých struktur, které můžete vidět na obrázku 9. a díky tomu se jim podařilo zvýšit průtok o 31 % a zvýšit účinnost o 20 %. Vnitřní tvar dutiny dále pomohl k vytvoření turbulentního proudění a ke snížení tlakové ztráty. [7]

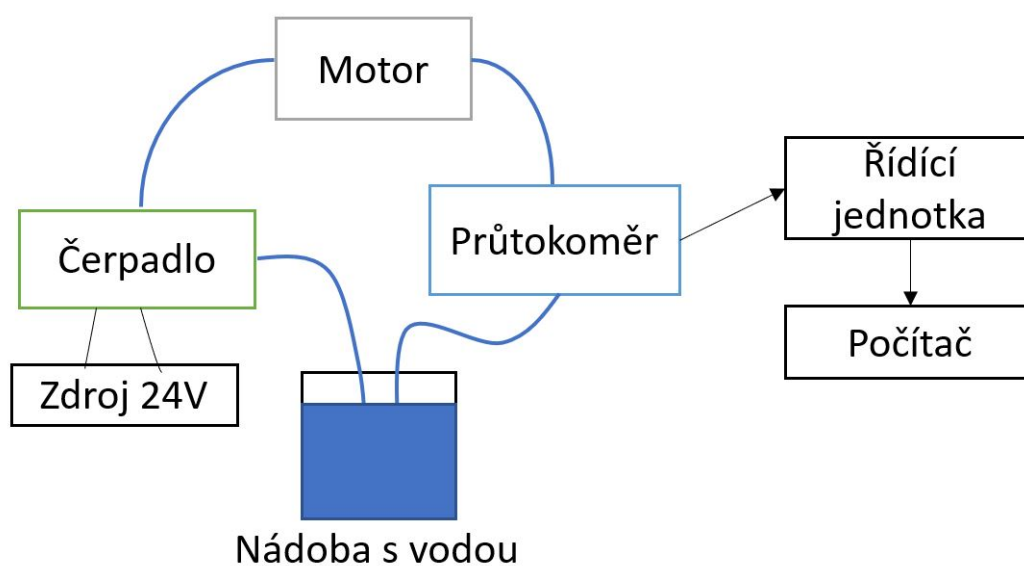


Obrázek 13: Chladicí plášť s pilířovitou strukturou (TUfast 2018) [7]

4 Měření

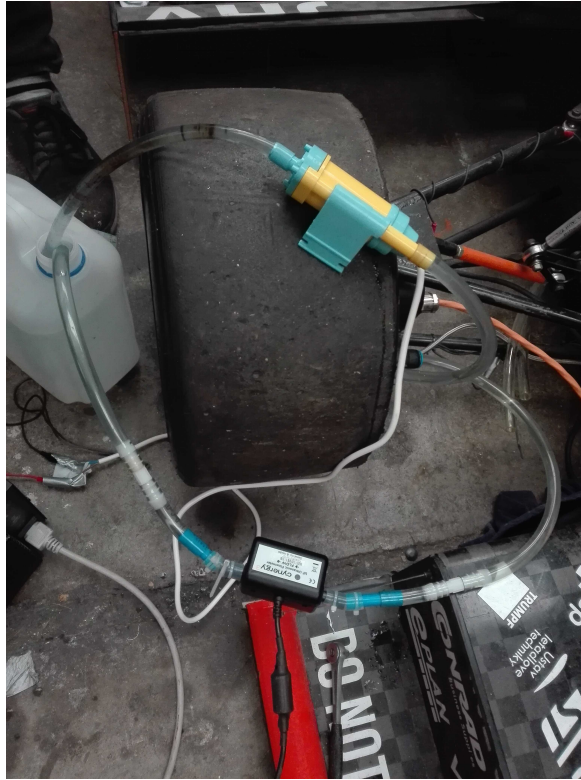
4.1 Měření průtoku

Pro získání vstupních dat pro simulaci v programu Fluent jsem potřeboval zjistit průtok vody a tlakovou ztrátu na předním motoru a na celém předním okruhu chlazení. Proto jsem se rozhodl provést měření na formuli, abych získal potřebná data. S měřením mi pomáhal můj kolega z týmu Josef Kopecký, který má na starost chlazení formule. Měření probíhala v dílně naší formule v laboratořích FEL ČVUT. Jako měřicí přístroj jsme použili ultrazvukový průtokoměr od značky Cynergy3, který funguje na principu měření doby průchodu ultrazvukového signálu skrz měřený objem. Data ze senzoru byla zpracovaná v jednotce, kterou vyrobil kolega z týmu Bc. Jan Mánek, která převádí analogový signál na sériovou komunikaci, kterou jsem následně zpracovával na mém počítači pomocí programu Terminal na textová data. Ty jsem následně přesunul do programu Microsoft Excel, ve kterém jsem vyhodnotil měření. [21]



Obrázek 14: Schéma měření průtoku na předním motoru

Jako první jsme měřili průtok samotného čerpadla Vovyo DC40, které jsme napájeli z externího zdroje napětím 24 V. K čerpadlu jsme připojili průtokoměr a nádobu s vodou, ze které čerpadlo odebíralo vodu. Dále jsme měřili průtok při zapojení předního motoru do okruhu z prvního měření. K tomu jsme použili motor z formule FSE.07, který má stejnou geometrii chlazení jako motor na současné formuli FSE.08. Jako poslední měření jsme provedli měření celého předního okruhu, na kterém se nalézá vodní pumpa DC40. Z důvodu jednoduché montáže jsme senzor průtoku jsme připojili na hadici, která vede z předního motoru do chladiče.



Obrázek 15: Měření průtoku předního motoru

Tabulka 1: Měření průtoku

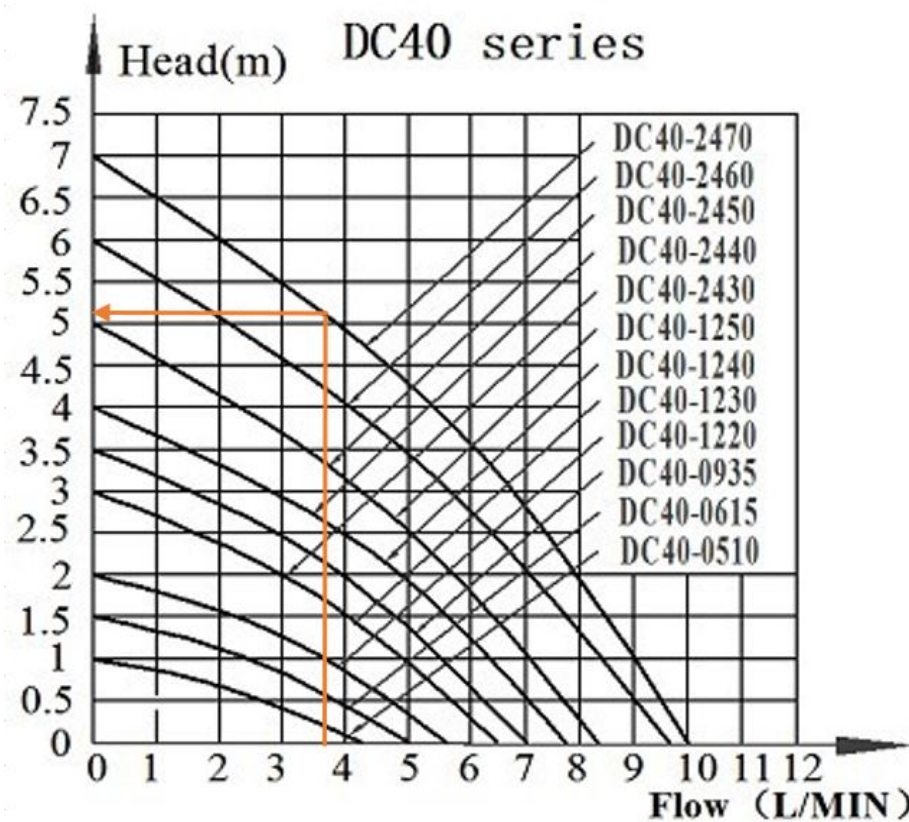
Sestava	\dot{V} [ml/s]	\dot{V} [l/min]
DC40	122,7	7,36
Přední motor + DC40	62,6	3,76
Přední okruh + DC40	39,1	2,35

V tabulce 1 můžete vidět naměřené hodnoty průtoku jednotlivých variant. Jen při samotném měření čerpadla byl jeho průtok jen 3/4 oproti udávanému maximálnímu průtoku. Když se do okruhu připojil motor, tak průtok čerpadla poklesl jen na necelých 40 % jeho maximálního průtoku a při zapojení na předním okruhu dává čerpadlo přibližně 25% průtok.

Z naměřených hodnot průtoku a katalogového listu čerpadla, ve kterém je uvedena závislost průtoku čerpadla na maximální výšce, do které čerpadlo dokáže čerpat vodu, jsem odečetl čerpací výšku pro změřený průtok a tu jsem následně převedl na tlak. Při zapojení pouze předního motoru je průtok na okruhu 3,76 l/min, což přibližně odpovídá tlakové ztrátě 50,5 kPa.



Obrázek 16: Ultrazvukový průtokoměr použitý pro měření



Obrázek 17: Odečítání tlaku z charakteristiky čerpadla při známém průtoku vody [8]



5 Praktická část

5.1 Výchozí model

Pro simulace v programu Ansys Fluent jsem zvolil jednodušší model, který vychází z motoru TGM4. V simulacích jsem vyhodnocoval trend mezi různými variantami a z toho důvodu jsem si mohl dovolit zjednodušení modelu motoru. Dle poskytnutého modelu a výkresové dokumentace motoru jsem vymodeloval kostru ve skutečné podobě z důvodu, že se v ní nalézá chladicí kanál, který jsem poté pro jednotlivé simulace měnil. Dále jsem nechal nezměněnou přední a zadní přírubu, protože definují vnější zástavbové rozměry. K výraznému zjednodušení došlo ve vnitřní části motoru. Ve statorových pleších jsem zanedbal drážky pro vinutí i vinutí samotné a celé je to sloučené do jednoho objemového tělesa. Dále je jako jedno těleso vymodelovány konce vinutí s teplovodivou pastou, ve které jsou konce zality. Stejný postup jsem aplikoval i na rotorovou část, kde je na hřídeli umístěno jednou těleso, které představuje celou rotorovou část.

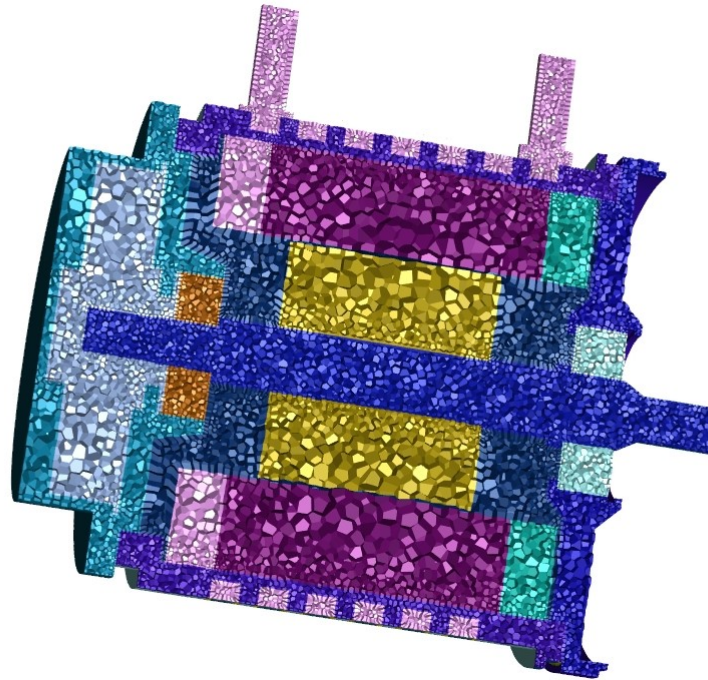
Celkové ztráty motoru nutné pro simulaci jsem musel odhadnout, protože výrobce motorů nemá pro daný typ motoru ztráty spočítané a pouze je také odhaduje. Při určení ztrát jsem vycházel z jízdních dat formule z minulých let, ze kterých lze odečíst elektrický a mechanický výkon motoru a z toho následně získat ztrátový výkon motoru, který jsem spočítal na 800 W. Jedná se o průměrnou hodnotu, která se mění v závislosti na jízdní trati, tedy na vytížení motoru. Při rozdělování ztrát jsem zanedbal mechanické ztráty na ložiscích a dalších částech, protože mi při konzultaci TG Drives sdělilo, že tyto ztráty jsou v porovnání s elektrickými a magnetickými ztrátami zanedbatelné. Získaný ztrátový výkon jsem poté rozdělil na stator a rotor v poměru 7:1, který jsem získal ze ztrát podobného motoru, pro který jsou dostupná podrobná data.

5.2 Nastavení simulace

Při nastavení výpočtů a velikosti sítě byl brán ohled na ušetření výpočetního výkonu, protože všechny simulace byly prováděny na notebooku. Tím pádem bylo možné provést výpočty za přijatelný čas a bylo možné provést poměrně rychlé úpravy v nepřesnostech sítě a při podobných problémech. Celkem jsem porovnával 5 různých variant kanálů.

S prvotním nastavením a zprovozněním simulace mi pomohla firma Techsoft Engineering, která má dlouholeté zkušenosti se simulacemi elektromotorů. Veškeré síťování probíhalo přímo v programu Ansys Fluent. Na Obr. 18 můžete vidět objemovou síť motoru, se kterou jsem následně prováděl simulace. Pro různé varianty jsem vždy síťoval jen změněnou kostru a plášť motoru, které jsem následně vložil do prvotního modelu,

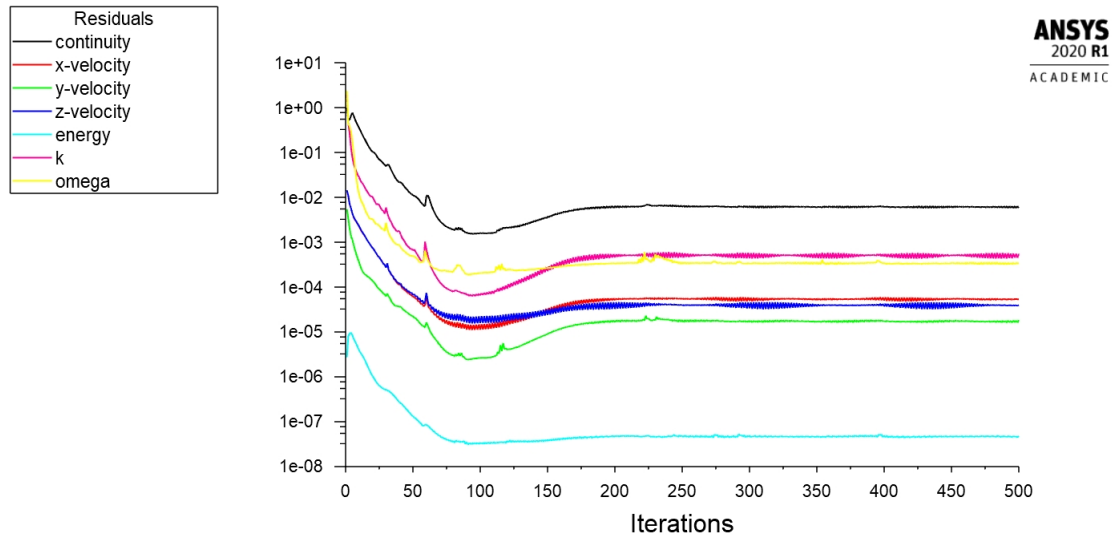
kde jsem jimi nahradil původními díly. Při výpočtech jsem uvažoval jen turbulentní proudění kapaliny, které je dané vysokým Reynoldsovým číslem, proto jsem zvolil pro simulaci turbulentní model K-omega SST, který mi byl i doporučen při konzultaci. Všechny varianty jsem vyhodnocoval po spočítání 500 iterací, po kterých se všechny simulace ustálily.



Obrázek 18: Objemová síť v Ansys Fluent

Při zadávání ztrát jsem nastavil stator a rotor jako objemový zdroj tepla a zadal na ně výkon přepočtený na W/m^3 . Dále jsem nastavil vtok jako mass-flow-inlet, tedy vstup určený hmotnostním průtokem a tuto hodnotu jsem v první variantě nastavil na $0,0626 \text{ kg/s}$, což je hodnota, kterou jsem získal z měření průtoku. Pro jiné varianty jsem musel k této hodnotě dojít iteračně, protože průtok závisí na tlakové ztrátě a pro jiné geometrie bude i jiná tlaková ztráta a tím pádem i jiný celkový průtok. Do těchto variant jsem zadával různé hodnoty průtoku. Tlakovou ztrátu ze simulace jsem porovnával s hodnotou, kterou jsem odečetl z grafu pro čerpadlo, po několika iteracích jsem dostal odpovídající průtok. 5% odchylku jsem bral jako přijatelnou chybu, protože při odečítání ze křivky se vždy dopustím nějaké chyby. Dále jsem do simulace musel zadat vstupní teplotu vody, kterou jsem nastavil na $55 \text{ }^\circ\text{C}$. I tato vstupní hodnota je závislá na několika faktorech, třeba na tom, kde se odehrávají závody. Pokud jsou ve Španělsku, kde je vysoká teplota okolního vzduchu, tak je na chladiči nižší gradient teploty a tím klesá jeho účinnost a není schopný o tolik ochladit protékající vodu. Proto jsem zvolil přibližně střední hodnotu z teplot, ve kterých se pohybujeme na závodech. Výtok jsem po konzultaci nastavil jako pressure-outlet. Jedná se o do-

poručenou kombinaci s mass-flow-inlet pro nízko-rychlostní proudění. Dále bylo nutné specifikovat backflow temperature, tedy teplotu vody při zpětném toku. Tu jsem získal po proběhnutí první simulace a po zadání této teploty jsem zpřesnil další simulaci. Dále jsem nastavil rotor a hřídel jako rotující část, aby docházelo k proudění vzduchu uvnitř motoru a tím realističtějšímu přestupu tepla mezi rotorem a okolím.



Obrázek 19: Ustálení výsledku simulace

Při vyhodnocení simulací a následném porovnání výsledku pro různé varianty jsem se zaměřil na výstupní teplotu, tlakovou ztrátu, maximální a průměrnou teplotu kostry, statoru a rotoru. Dále jsem sledoval rovnoměrnost rozložení teploty na povrchu kostry.

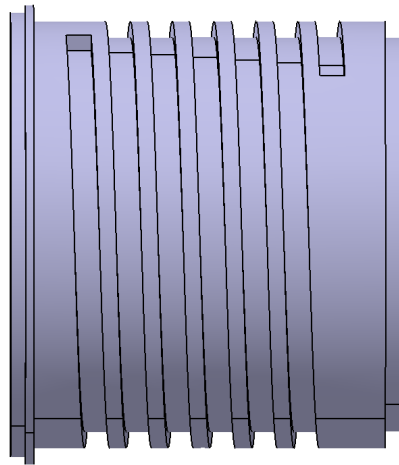
5.3 Varianta 1

Jako první variantu jsem zvolil chladicí kanál, který máme v současné době na motorech. Jedná se o jednochodou šroubovici o celkové osově délce 60 mm. Drážka je 6 mm široká a 3,9 mm vysoká. Stoupání šroubovice je 10 mm, tedy, tloušťka stěny mezi drážkami je 4 mm. Nejedná se o ideální tvar z několika důvodů. Jako hlavní nevýhodu jsem viděl velké množství materiálu po stranách konců šroubovice, které zbytečně zvyšuje celkovou hmotnost, a navíc snižuje efektivní plochu chlazení. Pro dobrý přestup tepla je nutná co největší kontaktní plocha mezi kapalinou a kostrou. Dále jsem očekával velkou tlakovou ztrátu způsobenou malým průřezem kanálu, kterým proudí voda.

V tabulce 2 můžeme vidět výsledky pro danou variantu. Při známém rozdílu teplot jsem mohl spočítat celkový odváděný tepelný výkon vodou dle vzorce

$$\dot{Q} = \dot{m}c\Delta T \quad (11)$$

kde $\dot{m}[kg \cdot s^{-1}]$ je hmotnostní tok, $c[J \cdot kg^{-1} K^{-1}]$ je měrná tepelná kapacita a $\Delta T[^\circ C]$ je rozdíl teplot. Vyšlo mi, že $\dot{Q} = 780W$. Dále mě zajímala celková tlaková ztráta, která se rovná rozdílu celkových tlaků, která vyšla $\Delta p = 56,85kPa$, což je přibližně 10% rozdíl oproti hodnotě z měření na formuli. Z důvodu takového rozdílu jsem se rozhodl provést simulaci s mnohem jemnější sítí vody a chladicího kanálu, abych zjistil, zda na to má vliv velikost sítě. Výsledná tlaková ztráta vyšla 55 kPa, což je 3,1% rozdíl oproti hrubé síti a 8,1% rozdíl oproti hodnotě, která vyšla z měření. Pro další simulace jsem se rozhodl používat nadále hrubší síť, protože rozdíl ve ztrátě je jen v řádu procent, ale výpočetní čas vzrostl v řádu stovek procent.



Obrázek 20: Varianta 1- současné řešení na předních motorech

Tabulka 2: Varianta 1

	Vstup	Výstup
Statická teplota vody [°C]	55	57,98
Statický tlak vody [kPa]	57,26	0
Celkový tlak vody [kPa]	58,06	1,21

Tabulka 3: Varianta 1 - Teploty komponent

	Maximální teplota	Průměrná teplota
Teplota kostry [°C]	62,2	60,1
Teplota statoru [°C]	64,3	62
Teplota rotoru [°C]	148,9	148,6

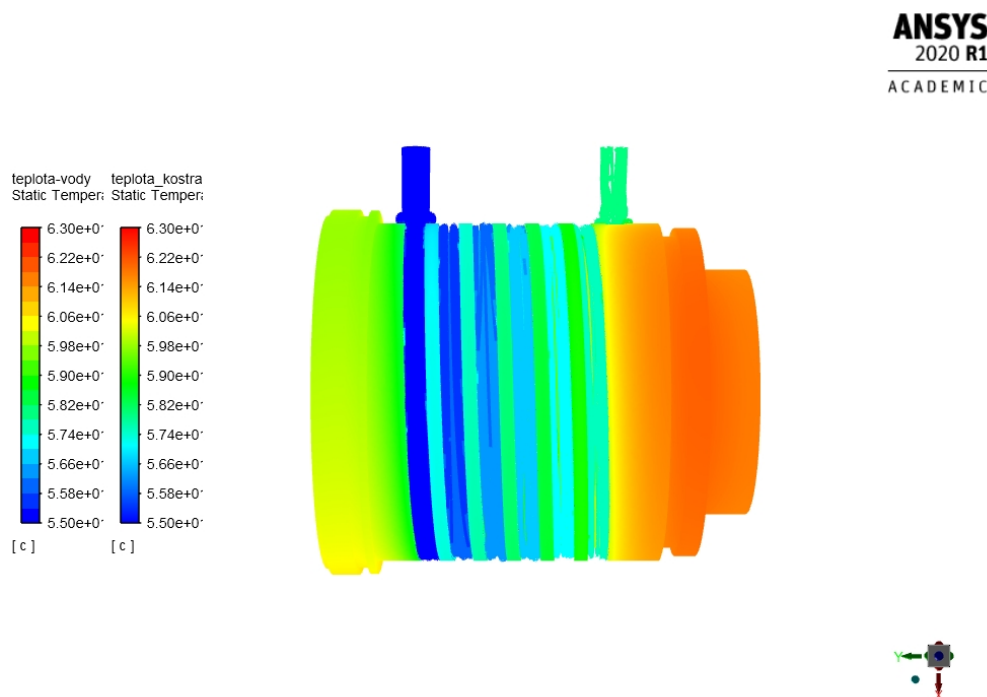
Dále jsem se rozhodl provést simulaci první varianty s mnohem nižším průtokem, který jsem nastavil na přibližně třetinový průtok a to na 0,02 kg/s, což je přibližně 1,2 l/min. Od tohoto kroku jsem očekával, že zjistím, jak hodně průtok vody ovlivňuje tlakovou ztrátu a teplotu jednotlivých komponent.

Z tabulky 4 vyplývá, že tlaková ztráta klesla o 85 %, takto velká procentuální změna je způsobená tím, že tlaková ztráta je přímo úměrná kvadrátu rychlosti proudění. Dále je vidět, že teplota kostry a statoru stoupla o 11 %, respektive o 12%, ale teplota rotoru jen o 4,4 %. Tento menší nárůst u rotoru je způsobený špatným přestupem tepla z rotoru vlivem okolního vzduchu.

Na Obr. 21 můžete vidět rozložení teploty na povrchu kostry motoru a teplotu vody. Je vidět, že tato varianta není ideální, protože šroubovitý tvar drážky znemožňuje chlazení na krajích kostry, kde vznikají oblasti s vyšší teplotou, které budou způsobovat lokální přehřívání motoru.

Tabulka 4: Varianta 1 - závislost sledovaných hodnot na průtoku

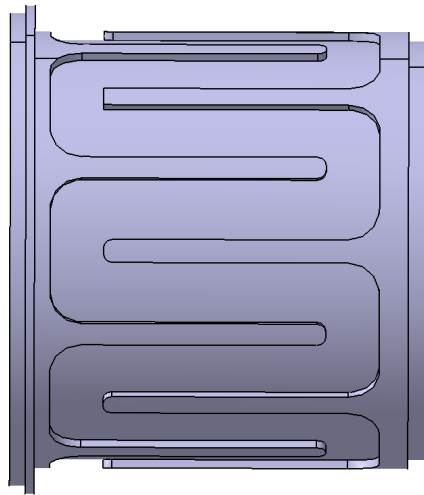
	Skutečný průtok	Nízký průtok	Rozdíl [%]
Tlaková ztráta [kPa]	56,5	8,5	-85
Teplota vody [°C]	58	64,5	11,2
Max. teplota kostry [°C]	62,2	69,9	12,4
Max. teplota statoru [°C]	64,3	71,3	10,9
Max. teplota rotoru [°C]	148,9	155,4	4,4



Obrázek 21: Varianta 1 - teplota vody a povrchu kostry

5.4 Varianta 2

Na Obr. 22 můžete vidět variantu číslo 2. Jedná se o převážně o axiálně vedené drážky, které jsou vždy na koncích propojené s vedlejší drážkou. Drážka je 2 mm vysoká, 14 mm široká a její osová délka je 74 mm. Jedná se o symetrický tvar v rovině os vstupu a výstupu, tím pádem může voda téct ze vstupu na obě strany souměrně a tím dojde k rovnoměrnějšímu chlazení motoru.



Obrázek 22: Varianta 2

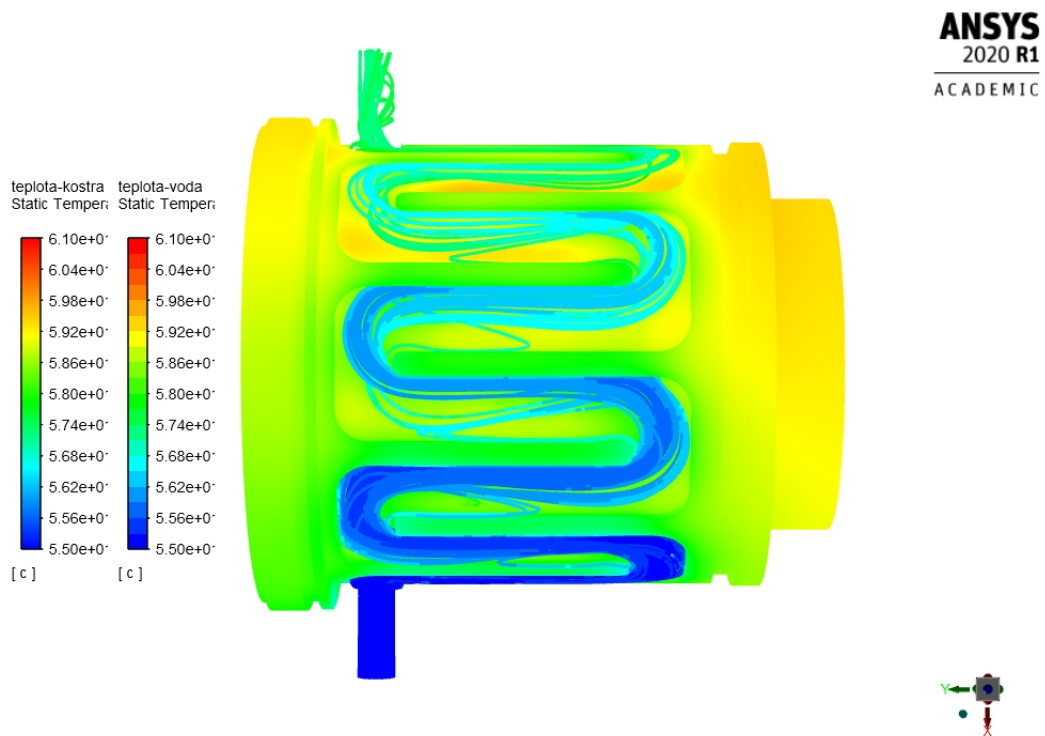
U této varianty jsem musel iteračně určit průtok vody, abych se shodoval s hodnotou odečtenou z charakteristiky čerpadla. Jako prvotní průtok jsem zadal 6 l/min. Pro tuto hodnotu vyšla tlaková ztráta 64 kPa a dle křivky pro čerpadlo by měla ztráta vyjít přibližně 34 kPa, takže jsem musel zvolit nižší průtok. Po několika iteracích mi vyšel finální průtok 4,9 l/min a s touto hodnotou jsem provedl finální simulaci a její výsledky jsou v tabulce 5. Výstupní teplota vody je nižší oproti první variantě, ale to je dáno vyšším průtokem. U této varianty je vidět zlepšení ve velikosti tlakové ztráty oproti první variantě, kde při průtoku větším o 23 % klesla tlaková ztráta o 26 %. Dále je z tabulky 6 vidět, že teploty jednotlivých komponent jsou nižší a je lepší přestup tepla mezi vodou a motorem.

Tabulka 5: Varianta 2

	Vstup	Výstup
Statická teplota vody [°C]	55	57,36
Statický tlak vody [Pa]	42,75	0
Celkový tlak vody [Pa]	44,12	1,77

Tabulka 6: Varianta 2 - Teploty komponent

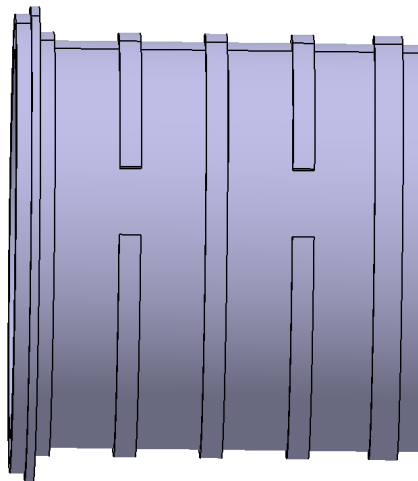
	Maximální teplota	Průměrná teplota
Teplota kostry [°C]	60	58,8
Teplota statoru [°C]	64,1	61,2
Teplota rotoru [°C]	145,6	145,3



Obrázek 23: Varianta 2 - teplota vody a povrchu kostry

5.5 Varianta 3

Na obrázku Obr. 24 můžete vidět třetí variantu kanálu, tuto geometrii nám nabídl TG Drives pro letošní rok. Jedná se o 3 široké drážky. Každá drážka je vždy spojena se sousední a tyto spoje jsou otočeny o 180° vůči sobě. Drážka je široká 14 mm a její výška je stejně jako u předchozí varianty vysoká pouze 2 mm. Vtok i výtok je situován na opačné straně, než nejbližší spoj drážek, proto voda může rovnoměrně téct na obě strany, což by mělo přispět ke snížení tlakové ztráty. Dále se zvýšila plocha dna drážky, která by měla zlepšit odvod tepla z motoru. Jako kritické místo téhle varianty jsem očekával spoj drážek, kde se setkávají protiběžné proudy vody, kde bude pravděpodobně nejvyšší tlaková ztráta, nejrychlejší rychlost vody a místo tvorby vírů. Po provedení iterací nutných pro zjištění průtoku mi vyšel finální průtok 5,4 l/min, který jsem následně zadal do simulace.



Obrázek 24: Varianta 3

V tabulce 7 můžete vidět výsledky pro třetí variantu. Oproti předchozí variantě stoupl průtok a tím se i logicky snížila výstupní teplota vody. Tlaková ztráta je o 13 % nižší než u předchozí geometrie, z toho plyne, že se jedná o vhodnější tvar. Na Obr. 25 je vidět, že dochází k rovnoměrnému ohřevu vody, ale rozložení teploty na kostře není rovnoměrné. Jsou na ni dvě teplejší oblasti a to mezi 2. a 3. drážkou, kde hlavní proudění ve třetí drážce je koncentrované dál od stěny, která se nalézá mezi jmenovanými drážkami a tím pádem tam vzniká teplejší oblast.

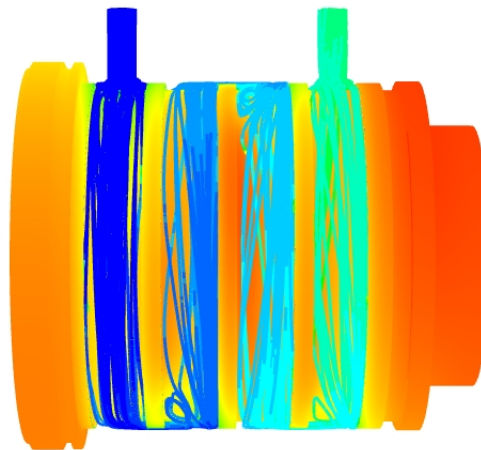
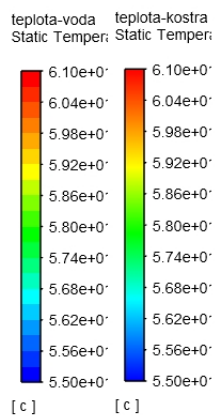
Tabulka 7: Varianta 3

	Vstup	Výstup
Statická teplota vody [$^\circ\text{C}$]	55	57,11
Statický tlak vody [Pa]	36,89	0
Celkový tlak vody [Pa]	38,6	1,83

Tabulka 8: Varianta 3 - Teploty komponent

	Maximální teplota	Průměrná teplota
Teplota kostry [°C]	60,7	59,7
Teplota statoru [°C]	64,7	61,9
Teplota rotoru [°C]	145,2	144,9

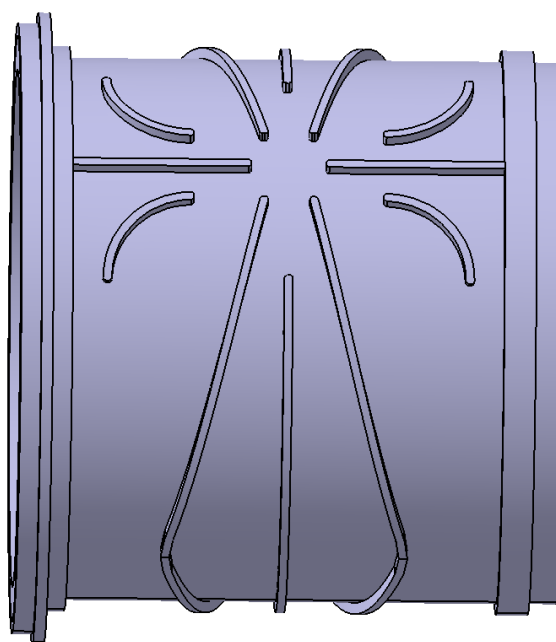
ANSYS
2020 R1
ACADEMIC



Obrázek 25: Varianta 3 - teplota vody a povrchu kostry

5.6 Varianta 4

Při návrhu tohoto kanálu jsem se inspiroval u německého týmu DHBW. Vtok a výtok jsou umístěny uprostřed motoru a jsou mezi sebou pootočené o 180° . Vtékající voda se může volně roztéct do všech stran, aby netekla přímo k výtoku, tak jsem na kostru umístil žebra, která by měla rozvést vodu i do krajů dutiny. U této varianty jsem nemohl použít průtok zjištěný z iterace, protože vyšel vyšší než průtok, který jsme změřili jen u samotného čerpadla. Proto jsem zvolil průtok $0,09 \text{ kg/s}$, tedy stejný, jako ve 3. variantě.



Obrázek 26: Varianta 4

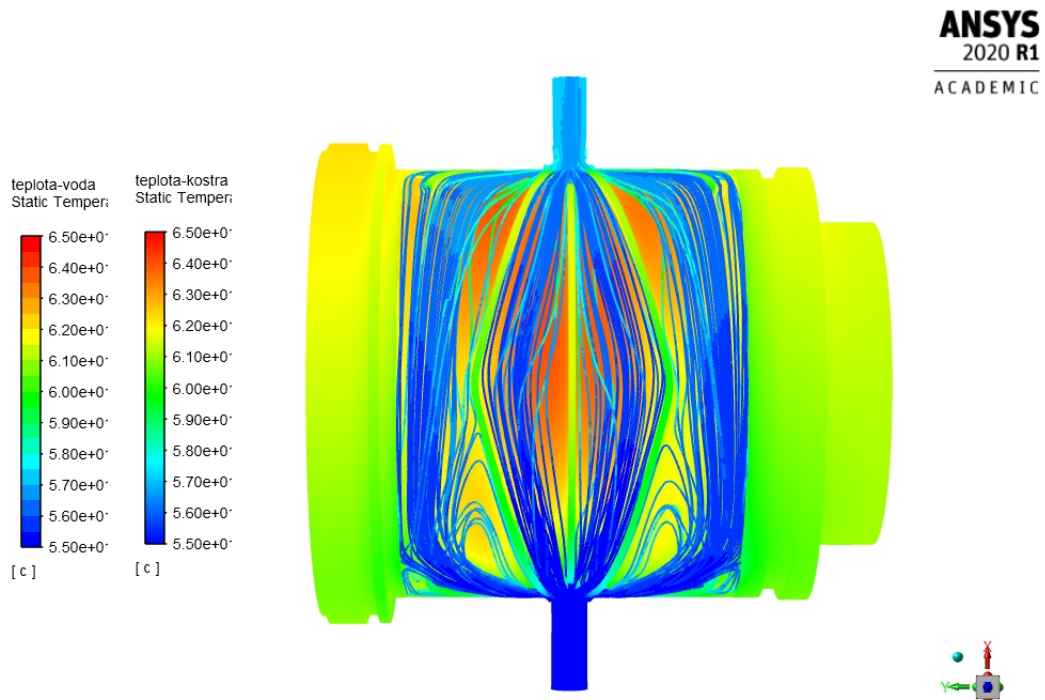
Z výsledků je vidět, že při daném průtoku je výstupní teplota vody téměř stejná jako u předchozí varianty, ale tlaková ztráta je ani ne desetinná. Z tabulky 10 a z Obr. 27 je vidět, že voda neproudí do všech míst dostatečně a v určitých místech se tvoří víry. Z toho důvodu nedochází v určitých místech k dostatečnému odvodu tepla a vznikají tak oblasti s mnohem vyšší teplotou.

Tabulka 9: Varianta 4

	Vstup	Výstup
Statická teplota vody [$^\circ\text{C}$]	55	57,12
Statický tlak vody [Pa]	3,32	0
Celkový tlak vody [Pa]	4,53	1,74

Tabulka 10: Varianta 4 - Teploty komponent

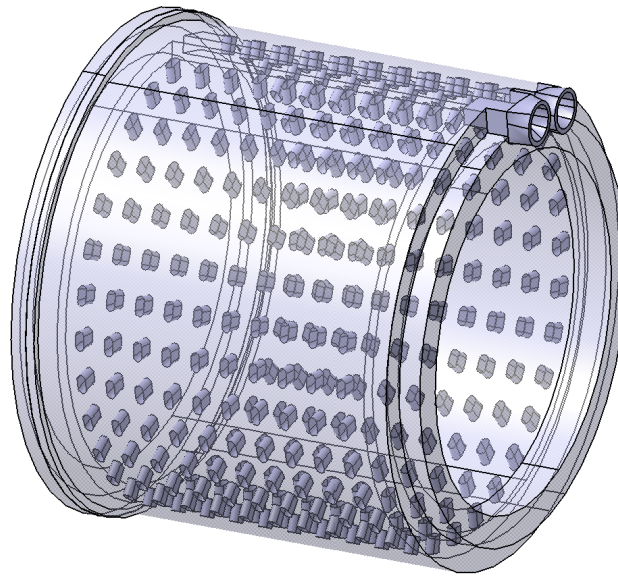
	Maximální teplota	Průměrná teplota
Teplota kostry [°C]	64,3	61,8
Teplota statoru [°C]	68	64,6
Teplota rotoru [°C]	148,9	148,6



Obrázek 27: Varianta 4 - teplota vody a povrchu kostry

5.7 Varianta 5

Při návrhu tohoto kanálu jsem se inspiroval u německého týmu z Mnichova, kde mají chladič plášť vyrobený pomocí sintrování. Jedná se o jednu velkou dutinu mezi kostrou a pláštěm motoru. Mezi vtokem a výtokem je stěna, aby nedocházelo k mísení teplé a studené vody. V dutině je několik stovek pilířů, které slouží k vytvoření turbulentního proudění kapaliny a také tam jsou nutné kvůli pevnosti daného dílu. Pro lepší proudění jsem zvolil vtok a výtok z čela motoru, abych toho dosáhl, tak jsem musel provést konstrukční úpravu čela kostry a částečně i zadního krytu motoru. Jelikož tato varianta obsahuje velké množství malých pilířů, tak jediný způsob výroby je pomocí sintrování. Pokud bych toto řešení vybral jako nejlepší, tak bych musel finální tvar konzultovat s firmou, která se zabývá spékáním kovů a také s firmou TG Drives, protože nemají zkušenosti s tištěnými díly a pravděpodobně by se musel nechat vyrobit prototyp dílu pro pevnostní zkoušky. U této varianty opět nešel určit průtok iteračně, tak jsem zadal stejný průtok jako u předchozích dvou geometrií a to 0,09 kg/s.



Obrázek 28: Varianta 5

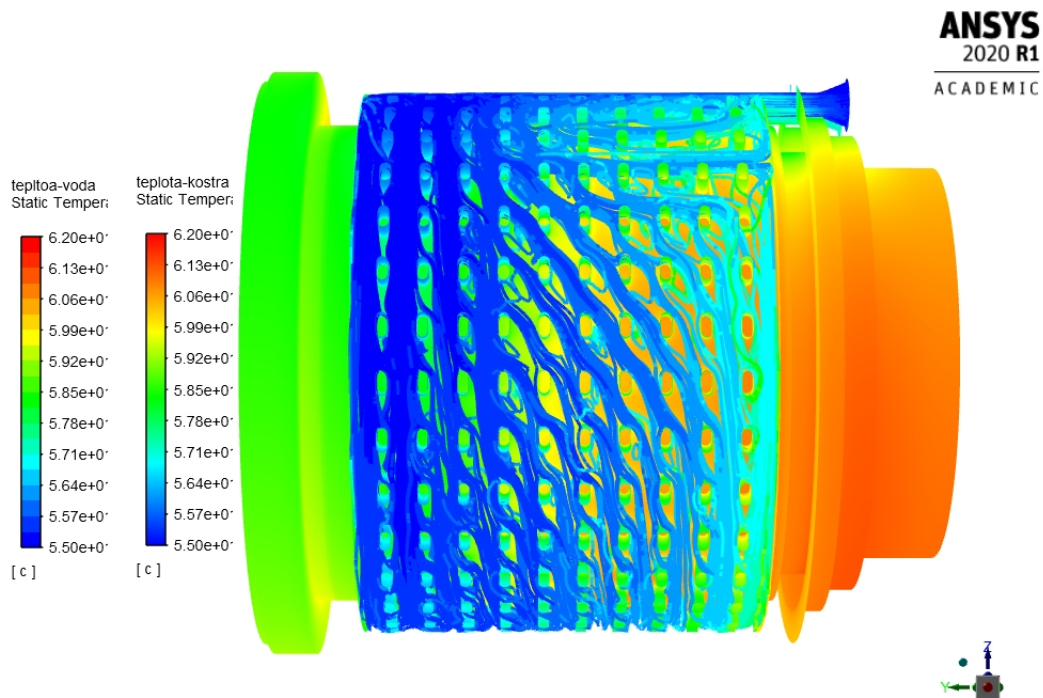
Z výsledku simulace je vidět, že odvádí teplo z povrchu lépe než předchozí varianta, ale hůře než zbylé. U tlakové ztráty to je naopak. Je vyšší než u předchozí varianty, ale lepší než u prvních tří. Z Obr. 29 je vidět, že pilíře fungují k rozptýlení toku vody, ale v určitých místech se tvoří víry, které snižují průtok v daném místě.

Tabulka 11: Varianta 5

	Vstup	Výstup
Statická teplota vody [°C]	55	57,07
Statický tlak vody [Pa]	19,62	0
Celkový tlak vody [Pa]	21,27	4,07

Tabulka 12: Varianta 5 - Teploty komponent

	Maximální teplota	Průměrná teplota
Teplota kostry [°C]	61,2	58,9
Teplota statoru [°C]	65,3	62,2
Teplota rotoru [°C]	146,5	146,2



Obrázek 29: Varianta 5 - teplota vody a povrchu kostry

5.8 Výběr nejlepší varianty

Po odsimulování všech variant jsem musel vybrat tu nejlepší z nich, kterou použijeme na motorech příští sezonu. Při porovnávání jsem postupně vyřazoval nejméně vhodná řešení. Nakonec jsem jako nejvhodnější možnost vybral 3. variantu, protože je kompromisem mezi tlakovou ztrátou a teplotou komponent.

Jako první jsem vyřadil současné řešení (varianta 1), protože má největší tlakovou ztrátu, která snižuje průtok na celém okruhu. Dále se šroubovice jeví jako nevhodný tvar, protože na krajích je velké množství materiálu, ze kterého se špatně odvádí teplo a zbytečně zvyšuje celkovou hmotnost.

Dále jsem vyřadil 4. variantu, i přesto, že má nejnižší tlakovou ztrátu ze všech možností. Hlavní nevýhodou tohoto řešení je, že má špatný přestup tepla mezi kostrou a vodou a z toho důvodu dochází k akumulaci tepla a výsledně vyšší teplotě na částech motoru. Například teplota na statoru je nejméně o 2,4 °C vyšší než u ostatních variant. Ve skutečnosti může být tento rozdíl i mnohem větší. Hlavní příčinou je pravděpodobně špatné proudění vody, kde v nějakých místech teče mnohem menší množství vody než v jiné části. Další příčinou může být malá plocha žeber, přes které se také odvádí teplo do kapaliny.

Dále jsem vyřadil variantu číslo 5, protože má vyšší teplotu komponent než zbývající 2 řešení a také nedochází k rovnoměrnému proudění vody. Na druhou stranu má toto řešení poměrně nízkou tlakovou ztrátu a také má nižší hmotnost, protože nepotřebuje plášť, který by překrýval kanál a také vstupní a výstupní otvor je lépe navržený. Z těchto důvodů toto řešení úplně nezavrhuji a rád bych se mu dále věnoval, ale to přesahuje časové možnosti této práce a také termín výběru finální varianty z důvodu výroby předních testovacích motorů pro tento rok. S největší pravděpodobností bude nutné upravit geometrii a rozvržení pilířů a také jejich výšku. Složitost tohoto řešení je možné zrealizovat jen výše zmíněným sintrováním, protože umožňuje navrhnout a vyrobit velmi složité vnitřní stěny určitého tělesa. I tato technologie má své limity, proto bych samotný návrh musel konzultovat pravděpodobně s nějakým odborníkem z firmy Misan, která nás sponzoruje a zabývá se prodejem strojů pro spékání kovových prášků. Jednou z mála nevýhod této technologie je vyšší výrobní cena dílů oproti třískovému obrábění.

Jako poslední dvě možnosti, mezi kterými jsem se rozhodoval byla 2. a 3. varianta. První zmiňovaná má nižší teplotu statoru a kostry přibližně o 0,5 °C, ale zase má vyšší teplotu rotoru a především vyšší tlakovou ztrátu. Po důkladném prozkoumání výsledků simulací jsem vyřadil variantu číslo 2, protože má vyšší tlakovou ztrátu o 12 %, ale

teploty nižší jen v řádu jednotek procent.

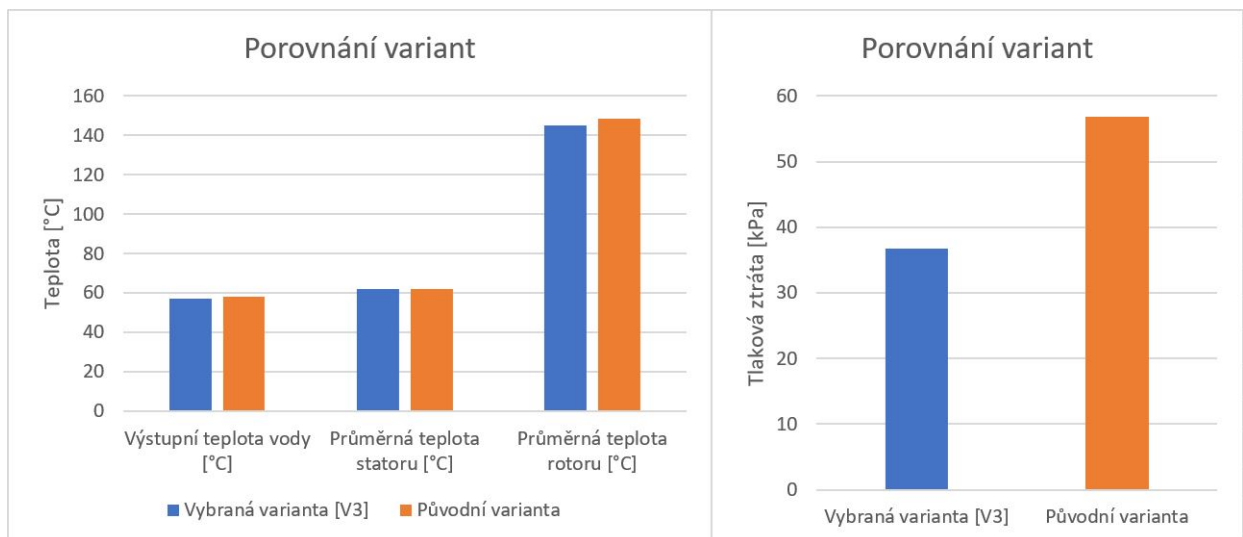
5.9 Porovnání vybrané varianty s původní

Na konci jsem se rozhodl porovnat vybranou variantu s tou původní, aby bylo vidět, v jakých věcech došlo ke zlepšení, ale případně i ke zhoršení. Porovnávané parametry i s výsledky jsem shrnul do tabulky.

Tabulka 13: Porovnání nové a původní varianty

	Vybraná varianta [V3]	Původní varianta	Rozdíl [%]
Tlaková ztráta [kPa]	36,77	56,85	-35,3
Výstupní teplota vody [°C]	57,11	57,98	-1,5
Průměrná teplota statoru [°C]	61,9	62	-0,2
Průměrná teplota rotoru [°C]	144,9	148,6	-2,5
Tepelný výkon chlazení [W]	793,8	779,8	1,8
Hmotnost kostry [g]	259	376	-31,1
Výrobní náročnost [-]	Nižší	Vyšší	-
Přibližná cena	Nižší	Vyšší	-

Ke zlepšení došlo ve všech porovnávaných parametrech. K největšímu zlepšení došlo u tlakové ztráty, která se zmenšilo o více jak 35 % a hmotnosti, kde je nový tvar lehčí o 117 g, respektive o 31,1 %. U dvou motorů je úspora skoro čtvrt kilogramu, což je v případě studentské formule poměrně dost.



Obrázek 30: Porovnání nové a původní varianty



6 Závěr

Cílem této práce bylo udělat rešerši kapalného chlazení elektromotorů v rámci soutěže Formula Student. Z této rešerše šlo vypořadovat, že týmy používají různé geometrie chlazení. Týmy čím dál častěji používají díly vyrobené pomocí aditivních technologií. Po vybraní různých geometrií chladicího kanálu, jsem tyto varianty musel vymodelovat a umístit do zjednodušeného modelu elektromotoru. Následně jsem všechny varianty odsimuloval v programu Ansys Fluent a porovnal výsledky simulací. Nakonec jsem se rozhodl pro 3. variantu, protože má, podle mého názoru, nejlepší poměr mezi sledovanými parametry. Tlaková ztráta se snížila 35 % a hmotnost kostry se snížila o 31,1 %. Jako další výhodou vybrané možnosti je, že nám tuto geometrii navrhla přímo firma TG Drives, která nám vyrábí motory a tím pádem nebude nutné provádět pevnostní zkoušky. V této práci se mi povedlo splnit počáteční cíle, kterými byly snížení teploty komponent motoru a snížení tlakové ztráty. U obou došlo ke zlepšení, dále se povedlo i snížit hmotnost kostry a zjednodušit výrobu.

Reference

- [1] Y. Gai, M. Kimiabeigi, Y. C. Chong, J. Widmer, X. Deng, M. Popescu, J. Goss, D. Staton, and A. Steven, “Cooling of automotive traction motors: Schemes, examples and computation methods- a review,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. PP, pp. 1–1, 05 2018.
- [2] G. Moreno, “Thermal performance benchmarking.” Dostupné z <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/64941.pdf>. [Online]. [cit. 2020-07-01].
- [3] “(5) audi e-tron cooling concept e-motor - youtube.” Dostupné z <https://www.youtube.com/watch?v=9fS50uvkTRE>. [Online]. [cit. 2020-07-01].
- [4] Wikipedia contributors, “Moody chart — Wikipedia, the free encyclopedia.” Dostupné z https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Moody_chart&oldid=965074587, 2020. [Online]. [cit. 2020-07-01].
- [5] “(5) rollout keynote 2019 - youtube.” Dostupné z <https://www.youtube.com/watch?v=jXX0Gb8xQgU&t=1287s>. [Online]. [cit. 2020-07-01].
- [6] “Etseib motorsport ev - dv (@etseibmotorsport).” Dostupné z <https://www.instagram.com/p/B4k7JX-HTg1/>. [Online]. [cit. 2020-07-01].
- [7] “Tu munich’s student racing team uses gkn’s metal am to boost vehicle performance.” Dostupné z <https://www.metal-am.com/tu-munichs-student-racing-team-uses-gkns-metal-am-to-boost-vehicle/performance/>. [Online]. [cit. 2020-07-01].
- [8] “Brushless dc pump(dc40)–vovyo technology co., ltd..” Dostupné z [http://www.dbrushlesspump.com/Brushless-DC-Pump\(DC40\)-p26.html](http://www.dbrushlesspump.com/Brushless-DC-Pump(DC40)-p26.html). [Online]. [cit. 2020-07-01].
- [9] F. fs-germany.org [online], *FSG: Formula Student Rules*. 2019. https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2020/rules/FS-Rules_2020_V1.0.pdf.
- [10] “eForce FEE Prague Formula.” Dostupné z <https://eforce.cvut.cz>. [Online]. [cit. 2020-07-01].
- [11] Y. Yang, S. M. Castano, R. Yang, M. Kasprzak, B. Bilgin, A. Sathyan, H. Dalkhah, and A. Emadi, “Design and comparison of interior permanent magnet motor topologies for traction applications,” *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 3, no. 1, pp. 86–97, 2017.

- [12] D. Collins, “Hysteresis loss and eddy current loss: What’s the difference?.” Dostupné z <https://www.motioncontroltips.com/hysteresis-loss>, 2020. [Online]. [cit. 2020-07-01].
- [13] J. Nožička, *Základy termomechaniky*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, vyd. 2 ed., 2008.
- [14] J. Šesták and F. Rieger, *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Praha: Vydavatelství ČVUT, vyd. 3 ed., 2004.
- [15] S. Ruoho, J. Kolehmainen, J. Ikaheimo, and A. Arkkio, “Interdependence of demagnetization, loading, and temperature rise in a permanent-magnet synchronous motor,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 3, pp. 949–953, 2010.
- [16] Wikipedia, “Audi e-tron (2018) — Wikipedia, the free encyclopedia.” Dostupné z [http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Audi%20e-tron%20\(2018\)&oldid=964812682](http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Audi%20e-tron%20(2018)&oldid=964812682), 2020. [Online]. [cit. 2020-07-01].
- [17] J. Nožička, *Mechanika tekutin*. Praha: Vydavatelství ČVUT, první ed., 2004.
- [18] Wikipedia contributors, “Darcy–weisbach equation — Wikipedia, the free encyclopedia.” Dostupné z https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Darcy%E2%80%93Weisbach_equation&oldid=957953221, 2020. [Online]. [cit. 2020-07-01].
- [19] “Amz racing.” Dostupné z <http://electric.amzracing.ch/en/about>. [Online]. [cit. 2020-07-01].
- [20] “Cars – etseib motorsport.” Dostupné z <https://etseib-motorsport.upc.edu/en/cat-family/>. [Online]. [cit. 2020-07-01].
- [21] “Ultrasonic flowmeter technology - flowmeters.com — universal flow monitors.” Dostupné z <https://www.flowmeters.com/ultrasonic-technology>. (Accessed on 07/01/2020).