



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

Fakulta Elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

**Ekonomické hodnocení novelizovaného návrhu
napájení školní formule**
**Economic evaluation of the revised power supply
design for school formula**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

Vedoucí práce: Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.

Marek Stejskal

Praha 2019



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stejskal** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **466118**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Ekonomické hodnocení novelizovaného návrhu napájení školní formule

Název bakalářské práce anglicky:

Economic evaluation of the revised power supply design for school formula

Pokyny pro vypracování:

- 1) Analyzujte stávající řešení trakční akumulátorové baterie formule student FSE 7.
- 2) Proveďte simulaci tepelného zatížení baterie.
- 3) Definujte možnosti snížení finanční náročnosti konstrukce akupaku, za současného zachování, nebo zvýšení jeho užité hodnoty.
- 4) Proveďte simulaci tepelného zatížení nového akupaku.
- 5) Na základě porovnání výsledků analýz a simulací stanovte, zda a jaká by vznikla finanční úspora v projektu FSE.

Seznam doporučené literatury:

- [1] WILCOX, David C. Turbulence modeling for CFD. 2nd ed. Anaheim: DCW Industries, 1998.
[2] Formula Student Rules 2019 [online]. V1.1. Formula Student Germany, 2018 [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2019/rules/FS-Rules_2019_V1.1.pdf
[3] 39. nekonvenční zdroje elektrické energie [online]. Praha: Česká elektrotechnická společnost, 2018 [cit. 2018-12-17]. ISBN 978-80-02-02786-7. Dostupné z: <http://www.nzee.cz>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Hrzina, Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **31.01.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. Pavel Hrzina, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
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 předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne:

.....

Marek Stejskal

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Pavlu Hrzinovi, Ph.D. za trpělivost, ochotu a veškerou pomoc při vedení této práce, stejně jako doc. Ing. Jiřímu Vašíčkovi, CSc. za odborné konzultace. Poděkování patří také členům týmu eForce za poskytnuté informace a odpovědi na mé otázky.

Abstrakt

Cílem této práce je pomocí analýzy procesu výroby a simulace chlazení navrhnout způsoby snížení nákladů na konstrukci akumulátoru studentské formule. Simulace chlazení akumulátoru je provedena v programu Ansys a na základě jejích výsledků došlo k porovnání účinnosti chlazení sedmé a osmé generace akumulátoru. Analýzou procesu výroby byly vyčísleny celkové náklady na výrobu akumulátoru, které byly dále rozděleny na režijní, procesní a materiálové náklady a byly identifikovány položky s vysokým podílem na celkových nákladech. U těchto položek byly navrženy možnosti snížení nákladů a provedeno porovnání nákladů na výrobu akumulátorů sedmé a šesté generace. Z porovnání vyplynula úspora pro novou generaci zhruba šest tisíc korun, porovnáním výstupů simulací chlazení akumulátorů bylo potvrzeno znatelné zlepšení efektivity chlazení v akumulátoru osmé generace.

Klíčová slova

bateriové články, Formula Student, akumulátor, eForce, simulace, ekonomická analýza, úspora

Abstract

The goal of this thesis is to propose means to achieve cost reduction of the manufacturing process of a student formula accumulator using an analysis of the manufacturing process as well as a cooling simulation. The simulation of an accumulator cooling efficiency is realized with Ansys software and a comparison of accumulator generations seven and eight cooling efficiency was made. The total cost of accumulator manufacturing process was quantified, this cost was further divided into overhead costs, cost of processes and cost of materials and items with greatest contribution to the overall cost were identified. Methods to decrease cost were proposed for these items and a total cost comparison between sixth and seventh generation accumulators was made. According to the comparison, approximately six thousand crowns were saved on the newer accumulator, while a significant increase in eight generation accumulator cooling efficiency was confirmed with the comparison of the simulation outputs.

Keywords

Battery cells, Formula Student, accumulator, eForce, simulation, economic analysis, cost reduction

Obsah

1. Úvod	13
2. Analýza stávajícího řešení ACP FSE.07.....	14
2.1 Představení soutěže Formula Student	14
2.1.1 Popis jednotlivých soutěžních disciplín	15
2.1.2. Vyhodnocení dopadu zpracování akumulátoru na bodový zisk v závodu.....	16
2.2. Vlastnosti akumulátoru monopostu FSE.07	16
2.2.1 Specifikace vozu	16
2.2.2. Teoretický úvod k lithium-iontovým akumulátorům a parametry použitých článků.....	17
2.2.3. Konstrukce akumulátoru a jeho chlazení	17
2.2.4. Zhodnocení dostupných informací o chlazení zkoumaného akumulátoru	20
3. Simulace tepelného zatížení akumulátoru FSE.07	21
3.1. Formulace problému	21
3.1.1. Současná metodika měření teplot akumulátoru.....	21
3.1.2. Softwarové nástroje pro zpracování tepelné simulace	21
3.2. Příprava k řešení simulace.....	23
3.2.1. Popis zvoleného postupu simulace	23
3.2.2. Model použitý pro simulaci a jeho rozdělení na elementární síť.....	24
3.3. Implementace modelu do výpočetního segmentu a provedení simulace	25
3.4. Výstup výpočetního programu pro simulaci akumulátoru FSE.07	25
3.4. Zhodnocení provedené simulace akumulátoru.....	26
4. Analýza finanční náročnosti konstrukce akumulátoru FSE.07	27
4.1. Náklady vzniklé během výrobního procesu akumulátoru	27
4.2. Specifika definování ekonomických ukazatelů v prostředí týmu studentské formule	28
4.3. Přehled obsahu souboru přílohy	28
4.4. Náklady na výzkum a vývoj.....	29
4.5. Vznikající režijní náklady a jejich výše	29
4.5.1. Cena pronájmu dílny	29
4.5.2. Cena vodného a stočného	30
4.5.3. Cena zemního plynu pro vytápění.....	30
4.5.4. Cena elektřiny.....	31
4.5.5. Shrnutí provedeného výpočtu režijních nákladů	31
4.6. Náklady sériové a prototypové výroby	32
4.7. Ohodnocení práce v jednotlivých odděleních.....	32
4.8. Určení nákladů na materiál	33

4.9. Přiřazení váhy jednotlivým procesům	33
4.10. Celkové náklady výroby akumulátoru	34
4.10.1. Výše celkových nákladů na výrobu akumulátoru a její složky	34
4.10.2. Detailní pohled na náklady procesů	34
4.10.3. Detailní pohled na náklady materiálů	36
4.11. Citlivostní analýza	37
4.11.1. Zkoumané vstupní a výstupní parametry	37
4.11.2. Výstup citlivostní analýzy	38
4.11.3. Zhodnocení výsledků citlivostní analýzy	39
4.12. Závěr ekonomického hodnocení a možnosti optimalizace	39
4.12.1. Návrh opatření pro snížení nákladů na materiál a jeho zpracování	39
4.12.2. Možnosti snížení nákladů na bateriové články a predikce vývoje	39
5. Simulace akumulátoru FSE.08	41
5.1. Konstrukční změny oproti minulé sezoně	41
5.2. Úpravy modelu akumulátoru před započítáním simulace	42
5.3. Rozdělení modelu nového akumulátoru na síť buněk	43
5.4. Zvolené parametry simulace	43
5.6. Výstup provedené simulace	43
5.7. Vyhodnocení informací z provedené simulace	45
6. Stanovení finanční úspory v projektu FSE	46
6.1. Porovnání nákladů pro výrobu akumulátoru FSE.06 a FSE.07	46
6.2. Vliv konkrétních úsporných opatření na celkové náklady	46
6.3. Zhodnocení provedené simulace z hlediska možností úspory	47
6.4. Celkové zhodnocení stanovení úspor	47
7. Závěr	48
Literatura	50
Seznam zkratk	52
Přílohy	53

Obrázky

Obrázek č. 1: Podíl jednotlivých disciplín na celkovém hodnocení.....	15
Obrázek č. 2: Vizualizace akumulátoru vozu FSE.07 bez horního víka [26]	18
Obrázek č. 3: Graf reálného vývoje teploty akumulátoru v kontextu teploty jednoho z trakčních motorů.....	19
Obrázek č. 4: Okno programu Ansys Workbench s rozpracovaným projektem simulace v modulu Fluent.....	22
Obrázek č. 5: Porovnání rozložení teplot v akumulátoru FSE.07 při jeho zatěžování, horní mapa představuje chlazený akumulátor, dolní mapa nechlazený. [27].....	23
Obrázek č. 6: Detail diagonálního řezu použitým modelem, rozděleným na síť konečného počtu elementů. Barva symbolizuje kvalitu buňky, modrá je nejlepší, červená nejhorší.	24
Obrázek č. 7: Výstup simulace proudění vzduchu stackem akumulátoru FSE.07, pohled shora.....	25
Obrázek č. 8: Výstup simulace proudění vzduchu stackem akumulátoru FSE.07 se zobrazenými stěnami článků	26
Obrázek č. 9: Graf podílu cen procesu na celkové ceně procesů.....	35
Obrázek č. 10: Graf podílu cen materiálu na celkové ceně materiálů	36
Obrázek č. 11: Vizualizace akumulátoru FSE.08.....	41
Obrázek č. 12: Porovnání stacků dvou generací akumulátoru, nalevo FSE.07, napravo FSE.08.....	42
Obrázek č. 13: Výstup simulace proudění vzduchu stackem akumulátoru FSE.08 se zobrazenými stěnami článků	44
Obrázek č. 14: Výstup simulace proudění vzduchu stackem akumulátoru FSE.08 se zobrazenými stěnami článků, boční pohled	44

Tabulky

Tabulka č. 1: Bodové ohodnocení jednotlivých disciplín soutěže Formula Student [4].....	14
Tabulka č. 2: Vybrané specifikace monopostu FSE.07 [3]	16
Tabulka č. 3: Jmenovité parametry bateriových článků Sony VTC5a [11]	17
Tabulka č. 4: Jmenovité hodnoty ventilátoru Sunon PSD1212PMBX-A, poskytnuté výrobcem [10]....	19
Tabulka č. 5: Ceny niklu a mědi pro výrobu akumulátoru FSE.07 [28].....	27
Tabulka č. 6: Výpočet ceny pronájmu dílny	30
Tabulka č. 7: Výpočet ceny za vodné a stočné	30
Tabulka č. 8: Cena zemního plynu pro vytápění dílny a její složky.....	31
Tabulka č. 9: Cena elektřiny, spotřebované při výrobě akumulátoru	31
Tabulka č. 10: Hodinové mzdy pro jednotlivé profese, podílející se na výrobě	32
Tabulka č. 11: Celkové náklady na výrobu akumulátoru.....	34
Tabulka č. 12: Ceny jednotlivých druhů procesů	35
Tabulka č. 13: Ceny jednotlivých druhů materiálů.....	36
Tabulka č. 14: Změna nákladů procesů při uvažování mediánu platů	38
Tabulka č. 15: Náklady procesů při uvažování devátého decilu platů	38
Tabulka č. 16: Hodnocení kvality meshe pro simulaci akumulátoru FSE.08	43

1. Úvod

Na Fakultě Elektrotechnické působí již devátým rokem samostatný tým eForce FEE Prague Formula, který se zabývá návrhem a stavbou elektrických monopostů, se kterými poté závodí v mezinárodní studentské soutěži Formula Student. Energie takového závodního monopostu je uložena v akumulátorové baterii. Ta je složena z několika set bateriových článků, které při zatěžování generují teplo, které je třeba odvádět. Odvod tohoto tepla není v současnosti řešen dostatečně efektivně a je potřeba ho optimalizovat. Tato bakalářská práce si klade za cíl provést simulaci tepelného zatížení akumulátorové baterie, aby bylo možné získat konkrétní představu o poměrech v baterii a efektivně napravit zjištěné nedostatky. Analýza tepelných poměrů bude následně doplněna analýzou výrobních nákladů, jejíž výstupy bude možné použít k další optimalizaci akumulátorové baterie.

Poznámka: Pro zjednodušující účely je v následujícím textu slovní spojení „akumulátorová baterie“ nahrazeno jednoslovným názvem „akumulátor“.

2. Analýza stávajícího řešení ACP FSE.07

2.1 Představení soutěže Formula Student

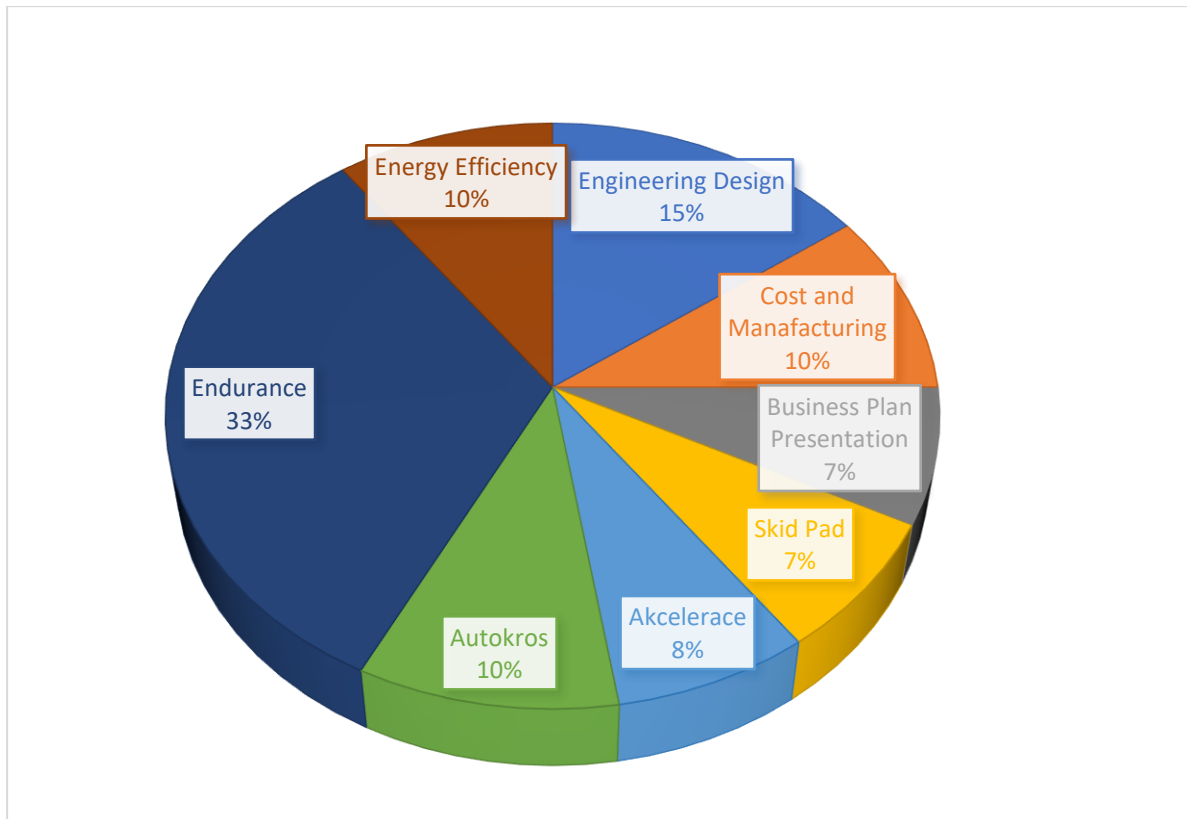
Akumulátory, jejichž analýza je předmětem této práce, navrhuje, vyrábí a používá tým eForce FEE Prague Formula, působící na Fakultě Elektrotechnické ČVUT. Tento celek vznikl v roce 2010 jako samostatná část týmu CTU CarTech, který působí na Fakultě strojní a zabývá se vývojem a výrobou studentské formule, poháněné spalovacím motorem. Naproti tomu eForce konstruuje výhradně elektřinou poháněná vozidla ^[1]. Oba týmy se účastní Formula Student, což je mezinárodní soutěž, založená v roce 1981 v USA pod záštitou Society of Automotive Engineers. První soutěž v Evropě se konala roku 1998 ^[2]. V ní týmy předpokládají, že jsou výrobcem, vyvíjející prototyp, který má být hodnocen pro produkci. Cílová skupina je ne-profesionální víkendový závodník. Závodní auto musí vykazovat velmi dobré charakteristiky řízení jako je akcelerace, brzdění a řízení. Má být nabízeno za velmi rozumnou cenu a být spolehlivé ^[2].

Soutěž samotná je rozdělená na sezóny, přirozeně dále rozdělené na několik fází a zakončené závody. Podle pravidel soutěže může být vozidlo pro závody použito po jeden rok, počítáno od prvního dne na místě jeho první soutěže ^[4] a dále aby bylo klasifikováno jako nové, vozidlo musí mít výrazné změny ve struktuře šasi oproti svému předchůdci ^[4]. Z těchto pravidel logicky vyplývá, že první částí sezóny pro soutěžní tým je navrhování vozidla pro novou sezónu. Po finalizaci návrhu následuje samotná výroba jak elektrických částí vozu jako jsou řídicí jednotky, jejich programování, výroba kabeláže a akumulátoru, tak i mechanických částí. Po sestavení formule pak vůz prochází testováním a případnými opravami defektních částí. Pokud je monopost včas připraven, následuje jeho účast na závodech, na které se tým přihlásil.

Závody sestávají z několika disciplín, které se dělí na statické a dynamické. Statické disciplíny jsou zaměřené na hodnocení technického a ekonomického návrhu vozidla, dynamické na jízdní vlastnosti monopostu a jeho schopnost závodit. Každá disciplína je ohodnocena určitým počtem bodů.

Tabulka č. 1: Bodové ohodnocení jednotlivých disciplín soutěže Formula Student [4]

Název disciplíny	Bodové ohodnocení
Engineering Design	150 bodů
Cost and Manufacturing	100 bodů
Business Plan Presentation	75 bodů
Skid Pad	75 bodů
Acceleration	75 bodů
Autocross	100 bodů
Endurance	325 bodů
Energy Efficiency	100 bodů



Obrázek č. 1: Podíl jednotlivých disciplín na celkovém hodnocení

2.1.1 Popis jednotlivých soutěžních disciplín

1. Statická část ^[4]:

- 1.1. *Engineering Design*: Posouzení návrhu a konstrukce vozidla z hlediska jejich kvality a provedených inovací. Týmy prezentují své řešení před odbornou porotou, základ prezentace tvoří dokument Engineering Design Report, který týmy sepisují pro každý model vozidla, porota tým hodnotí i na základě fyzické prohlídky formule.
- 1.2. *Cost and Manufacturing*: Hodnotí jednak schopnost týmu nacenit vyrobený soutěžní prototyp, jednak schopnost navrhnout malosériovou výrobu jednoho tisíce kusů tohoto prototypu. K nacenění prototypu slouží dokument Bill of Materials, který zahrnuje nejen cenu samotných součástí vozu, ale i časovou náročnost jejich montáže, cenu potřebného nářadí, strojů atd. Pro hypotetickou sériovou výrobu jsou hodnoceny aspekty jako rozhodnutí mezi nákupem součástí a jejich výrobou, efektivita finančního plánování nebo dopad výroby na životní prostředí.
- 1.3. *Business Plan Presentation*: Krátká prezentace, která má přesvědčit porotu v roli potenciálních investorů o rentabilitě výroby soutěžního prototypu. Tato disciplína má za úkol posoudit schopnost týmů sestavit smysluplný business plán a poté ho během deseti minut odprezentovat rozhodčím – investorům.

2. Dynamická část ^[4]:

- 2.1. *Skid Pad*: Jízda po trati ve tvaru číslice osm. Startovní a zároveň cílová čára je ve středu pomyslné osmičky, hodnotí se čas průjezdu formule po jedné kružnici. Vozidlo postupně řídí dva řidiči, každý z nich odjede právě dva měřené úseky, každý z nich na jiné kružnici osmičky.
- 2.2. *Acceleration*: Akceleraci formule absolvuje na přímé trati o délce 75 metrů. Měří se čas, za jaký zvládne řidič trať ujet, přičemž za každý tým závodí dva řidiči a každý má právě dva pokusy.

- 2.3. *Autocross*: Jízda na čas po trati s délkou menší než 1.5 km, trať je složena z různých segmentů jako rovinky, zatáčky s diametrem do 50 metrů, vlásenky, šikany, slalom a další. Každý tým má, jako u předchozích disciplín, dva pokusy pro každého ze dvou řidičů.
- 2.4. *Endurance*: Hlavní disciplína celého závodu. Jedná se o uzavřenou trať, podobnou autokrosu, po které vozy jezdí několik kol tak, aby součin délky trati a počtu ujetých kol byl roven 22 km. Na odjetí této disciplíny mají týmy pouze jeden pokus. Vůz řídí celkem dva jezdci, kteří se vymění po 11 kilometrech. Bodově se hodnotí čas, za který formule závod odjede, a navíc každý tým, který Endurance úspěšně odjede, získá pevně stanovený bodový základ.
- 2.5. *Energy Efficiency*: Efektivita se měří při absolvování disciplíny Endurance. Body zde mohou získat pouze týmy, které za Endurance obdržely alespoň jeden bod a zároveň měly dostatečně rychlý čas. Zde se bodově hodnotí efektivita využití elektrické energie vůči času, který monopost v Endurance zajel.

2.1.2. Vyhodnocení dopadu zpracování akumulátoru na bodový zisk v závodu

Z popisu disciplín vyplývá, že akumulátor ovlivňuje bodový zisk ve všech disciplínách. Zatímco u statické části je důležitá hlavně jeho cena a do jisté míry i kvalita návrhu, pro dynamickou část soutěže je spolehlivý a efektivní akumulátor kritický. Pokud by nebyl monopost schopen ujet delší trať a kvůli tomu dokončit disciplíny Autokros a Endurance, získal by v těchto kategoriích a potažmo i v Energy Efficiency nula bodů, čímž by tým přišel o 53 % bodů z celkového hodnocení závodu. Akumulátor je tedy jednou z velmi důležitých součástí formule a na kvalitu jeho návrhu a výroby jsou kladeny velké požadavky.

2.2. Vlastnosti akumulátoru monopostu FSE.07

2.2.1 Specifikace vozu

Akumulátor, který je zkoumán v této práci, byl navržen a vyroben na sezonu 2017/2018 pro formuli s označením FSE.07, tedy sedmou generaci vozu. Tento model má rám složený z kompozitního monokoku sendvičové struktury z uhlíkových vláken a pěnového jádra s hlavním obloukem z chrommolybdenové vysokopevnostní oceli a předním obloukem z pevnostního hliníku. Pohon desetipalcových kol zajišťují dva přední motory o výkonu 8,6 kW a dva zadní motory o výkonu 35,3 kW. Ty jsou napájeny z akumulátoru přes dvojici frekvenčních měničů vlastního návrhu [3]. Každý motor je možno řídit zvlášť, což umožňuje i aktivní elektronický diferenciál, taktéž navržený týmem. Celkem má tedy vůz výkon 87,8 kW [3], který je ovšem omezen na 80 kW podle pravidla: Výkon trakčního systému na výstupu z kontejneru akumulátoru nesmí přesáhnout 80 kW [4].

Tabulka č. 2: Vybrané specifikace monopostu FSE.07 [3]

Rozvor	1540 mm
Rozchod (vpředu / vzadu)	1296 / 1230 mm
Hmotnost vozu	205 kg
Maximální otáčky (vpředu / vzadu)	9000 ot · min ⁻¹ / 10000 ot · min ⁻¹
Maximální točivý moment	882 Nm do 60 km · h ⁻¹
Měnič	Duální frekvenční pro výkon až 2x100 kW

2.2.2. Teoretický úvod k lithium-iontovým akumulátorům a parametry použitých článků

Akumulátor je obecně zařízení, které slouží k uložení energie. V této práci bude zkoumána baterie, složená ze sekundárních elektrochemických článků, konkrétně lithium-iontových. Sekundární článek se od primárního článku liší tím, že je nutné mu před použitím dodat energii nabitím a tento cyklus vybití–nabití je možné opakovat. Elektrochemický článek pracuje na principu přeměny elektrické energie na chemickou a zpět. Jedná se o jeden z hlavních druhů akumulátorů elektrické energie, další způsoby akumulace jsou například mechanická, tepelná nebo elektromagnetická. Energie může být v sekundárním elektrochemickém článku uložena několika způsoby, v olověném akumulátoru je to kombinace olověných elektrod a kyseliny sírové jako elektrolytu. Další možností je například alkalický akumulátor, jehož katoda je tvořena oxidem manganičitým, nasyceným grafitem z důvodu zvýšení vodivosti. Anoda je tvořena zinkem a obě elektrody jsou odděleny separátorem z netkané textilie a celofánu. Velkou nevýhodou tohoto článku je nízký počet nabíjecích cyklů [7].

Lithium-iontové články mají uhlíkovou anodu, katodu z oxidu kovu a jako elektrolyt lithiovou sůl v organickém rozpouštědle. Výhodami lithium-iontových článků jsou vysoká hustota energie, vysoká kapacita, vysoké jmenovité napětí 3.6 V a nízké samovybití. Konkrétně jsou v tomto modelu akumulátoru použity články Sony VTC5a s NMC katodou, zkratka NMC označuje oxid nikl-mangan-kobaltu. V následující tabulce jsou uvedeny jmenovité parametry těchto článků:

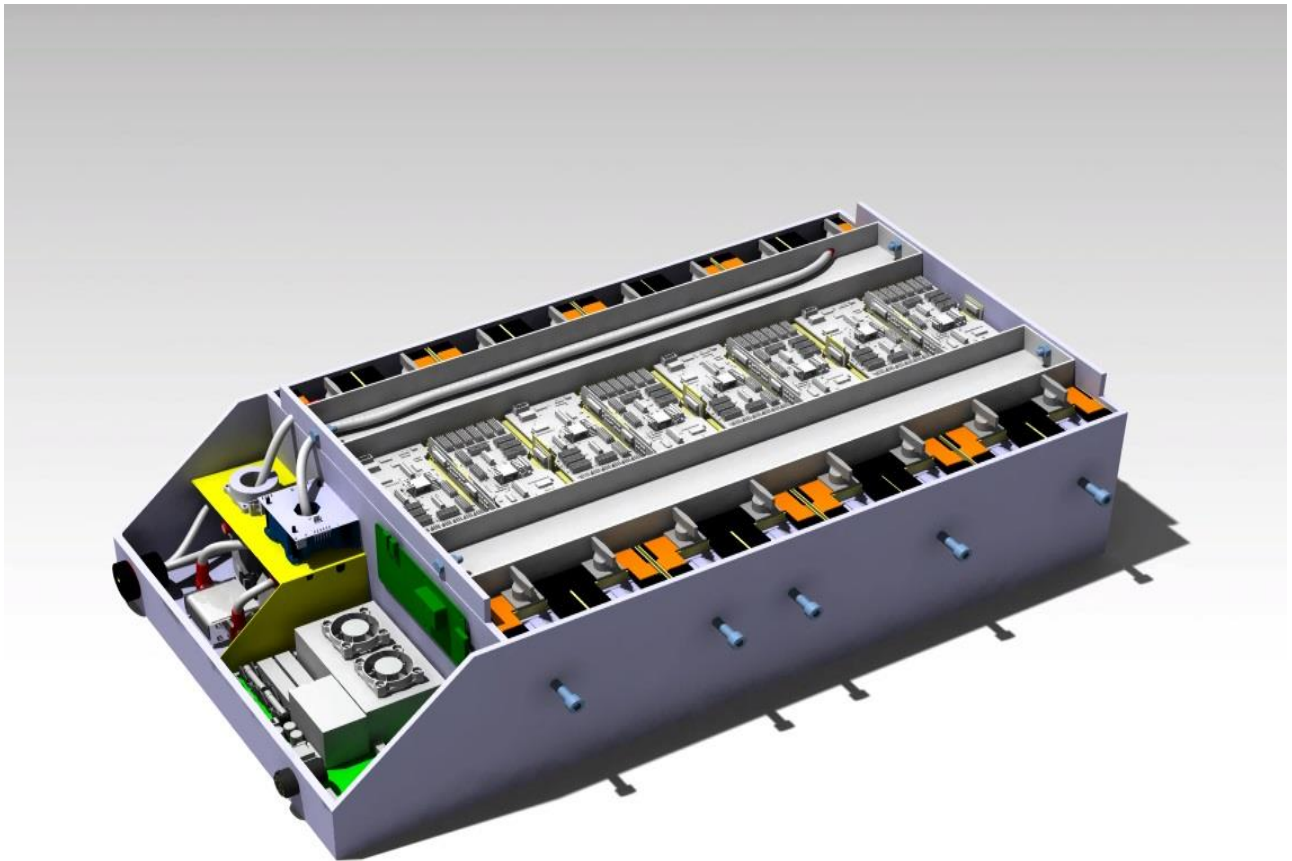
Tabulka č. 3: Jmenovité parametry bateriových článků Sony VTC5a [11]

Parametr	Hodnota
Jmenovitá kapacita:	2600 mAh
Jmenovité napětí:	3.6 V
Konečné nabíjecí napětí:	4.2 V
Objemová hustota energie:	526 Wh · l ⁻¹
Konečné vybíjecí napětí:	2.0 V
Maximální kontinuální vybíjecí proud:	30 A

Aby bylo dosaženo požadovaného trakčního napětí 400 V, byl akumulátor navržen se zapojením 96 článků sériově a 9 paralelně. Na tomto zapojení je teoreticky možné při nabití na konečné nabíjecí napětí 4.2 V naměřit 403.2 V, vypočtených jako počet sériově zapojených článků krát napětí jednoho článku. Celková kapacita tohoto zapojení je 23,4 Ah, vypočteno jako počet paralelně zapojených článků krát jmenovitá kapacita.

2.2.3. Konstrukce akumulátoru a jeho chlazení

Základem pro uložení akumulátoru je kontejner, ve kterém musí být uzavřeny všechny články. Pravidla soutěže Formula Student se akumulátoru vozidla podrobně věnují a stanovují mnoho podmínek, které musí hotová jednotka splňovat, aby se dala považovat za bezpečnou. Akumulátorový kontejner tak musí být například adekvátně izolován, uchycen k primární struktuře vozu a materiály, ze kterých je zkonstruován, musí zpomalovat hoření. Dále je nutné, aby kompletní akumulátor a jeho uchycení vydržel přetížení 40 G v horizontálních směrech, tedy doleva/doprava a dopředu/dozadu a přetížení 20 G ve vertikálním směru nahoru/dolů. Kontejner musí dále obsahovat minimálně jednu pojistku a minimálně dva AIRy [4].

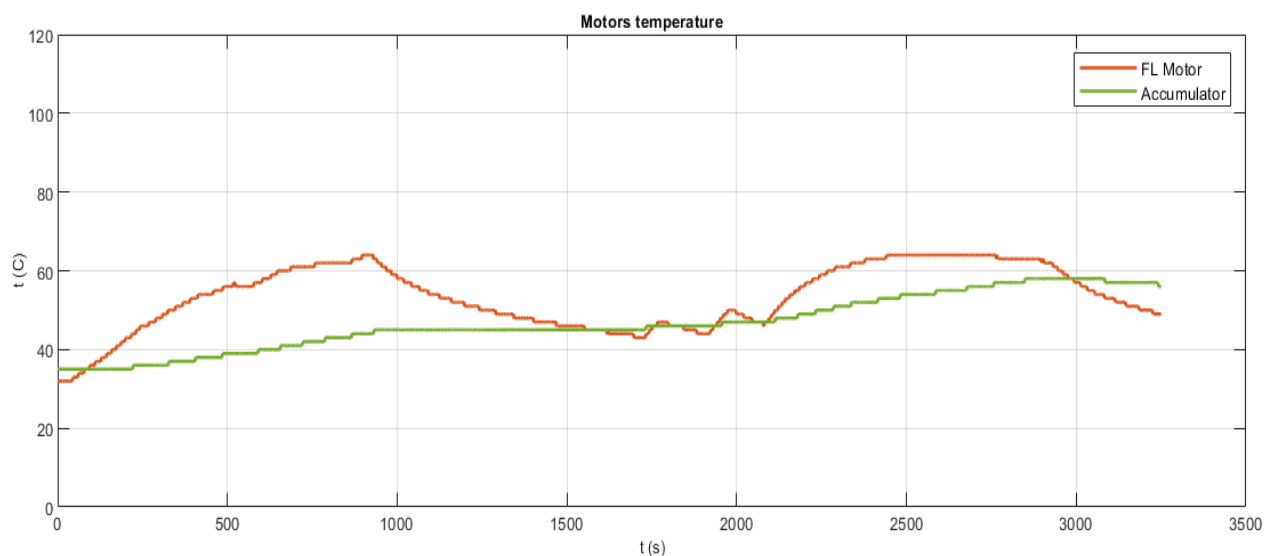


Obrázek č. 2: Vizualizace akumulátoru vozu FSE.07 bez horního víka [26]

Pravidla také stanovují, že každý akumulátor musí být vybaven funkčním AMS. Tento systém musí být aktivní kdykoliv, kdy je aktivní LVS nebo je akumulátor připojen k nabíječce, a nepřetržitě měřit ^[4]:

- Napětí na všech článcích
- Proud trakčního systému
- Teplotu kritických článků
- Pro lithiové články: teplotu minimálně 30 % článků, rovnoměrně rozložených v akumulátoru

AMS zkoumaného akumulátoru tyto požadavky splňují, teplota je navíc měřena u 50 % článků. Samotné měření teploty je realizováno pomocí NTC termistorů. Termistor je elektronická součástka, jejíž elektrický odpor závisí na teplotě, označení NTC – Negative Temperature Coefficient – značí, že s rostoucí teplotou odpor součástky klesá ^[9]. Měření teplot je důležité nejen pro diagnostiku vozu a další vývoj, ale pravidla stanovují i maximální teplotu, na které se články mohou zahřát: Maximální teplota článku je 60 °C nebo limit uvedený v datasheetu podle toho, která z těchto hodnot je nižší ^[4]. Podle dat z minulých sezón soutěže víme, že tento limit je nutné brát v potaz zejména v disciplíně Endurance, kdy je při průběžném monitorování diagnostických dat nutné identifikovat hrozící přehřátí a upravit styl jízdy tak, aby teplota článků rostla pomaleji.



Obrázek č. 3: Graf reálného vývoje teploty akumulátoru v kontextu teploty jednoho z trakčních motorů

Na grafu výše jsou vyneseny dva průběhy teploty v závislosti na čase, zelená barva zobrazuje vývoj teploty akumulátoru a oranžová vývoj teploty levého předního motoru formule. Tento průběh byl získán při testování vozu na trati, která byla postavena tak, aby co nejvěrněji simulovala závodní disciplínu Endurance. V grafu lze vidět, že akumulátor se z počáteční teploty cca 37 °C při zatěžování, které odpovídá zhruba zatížení při závodu, ohřeje až na teplotu blízkou 60 °C, což je horní hranice, při které lze články bezpečně provozovat. Pro referenci lze pozorovat teplotu jednoho z motorů, pro kterou zjednodušeně platí, že při zatěžování akumulátoru – jízdě – stoupá, zatímco pokud je vozidlo v klidu, klesá. V grafu stojí za pozornost také oblast mezi cca 1000. sekundou a 1700. sekundou, kdy bylo vozidlo v klidu. Zatímco teplota motoru zde významně klesá díky odvodu tepla vodním chlazením, teplota vzduchem chlazeného akumulátoru zůstává konstantní.

Chlazení akumulátoru je aktivní vzduchové, zajištěné trojicí axiálních ventilátorů Sunon, každý o výkonu 36 W ^[10]. Parametry těchto ventilátorů jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka č. 4: Jmenovité hodnoty ventilátoru Sunon PSD1212PMBX-A, poskytnuté výrobcem [10]

Parametr	Hodnota
Jmenovité napětí	12 V
Jmenovitý proud	3 A
Jmenovitý výkon	36 W
Rychlost	6000 ot/min
Průtok vzduchu	106,9 l/s
Statický tlak	298,91 Pa
Šum	65,5 dBA

2.2.4. Zhodnocení dostupných informací o chlazení zkoumaného akumulátoru

Doposud uvedené informace lze shrnout do několika bodů, které popisují současný stav řešení tepelné stránky akumulátoru. Hlavním cílem v této oblasti je dodržení limitu maximální teploty článku 60 °C. Ten je daný jednak pravidly soutěže, jednak výrobcem použitých článků, který také jako nejvyšší dovolenou teplotu, při které je dovoleno články používat, udává teplotu 60 °C [11]. V závodu, konkrétně při disciplíně Endurance, však často nastává situace, kdy je třeba omezit výkon, odebíraný z akumulátoru. Toto omezení pak přímo ovlivňuje čas, za který závodník disciplínu zajede, tím i bodový zisk a celkové umístění v závodu. S efektivněji chlazeným akumulátorem by omezování již nebylo nutné a změna by se tak mohla přímo promítnout do úspěšnosti týmu v závodech.

Komponenty v akumulátoru jsou nyní rozloženy podélně ke směru jízdy a vzduchové otvory jsou konstruovány tak, aby chladicí vzduch proudil akumulátorem rovněž podélně. Vzduch do akumulátoru vstupuje volně třemi otvory, přičemž dva jsou umístěny na bocích kontejneru akumulátoru a jeden v prohlubni pod úrovní víka akumulátoru, zády ke směru jízdy. Cestou pro výstup chladicího média jsou dvě řady menších obdélníkových otvorů na zadní straně kontejneru, na které navazují tři ventilátory. Ty mají za úkol vytlačovat již ohřátý vzduch ven z prostoru článků a zároveň i ven z vozidla.

Současný stav chlazení je tedy nedostatečný a je třeba pracovat na jeho zlepšení, což je cílem této práce. I při maximální optimalizaci chladicího systému je však nutné brát v úvahu fakt, že zvolené chladicí médium, tedy vzduch, je sice jednoduše použitelné, ale jeho schopnosti vedení tepla jsou omezené. To dokazuje hodnota součinitele tepelné vodivosti vzduchu při tlaku 0,1 MPa a teplotě 20 °C, kdy $\lambda = 0,026 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [12], zatímco hodnota součinitele tepelné vodivosti dalšího potenciálně využitelného chladiva – vody – je při stejných podmínkách $\lambda = 0,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [12]. Součástí budoucí optimalizace chladicího systému by tedy měla být i analýza alternativních chladících médií.

3. Simulace tepelného zatížení akumulátoru FSE.07

Důležitým krokem k optimalizaci chladicího systému akumulátoru by měla být simulace návrhu akumulátoru a následné vyhodnocení získaných dat. To umožní prozkoumat v období návrhu vozu několik možných variant a vybrat z nich tu nejefektivnější. V případě akumulátoru navíc není reálně postavit několik jeho prototypů, což ještě umocňuje důležitost simulace.

3.1. Formulace problému

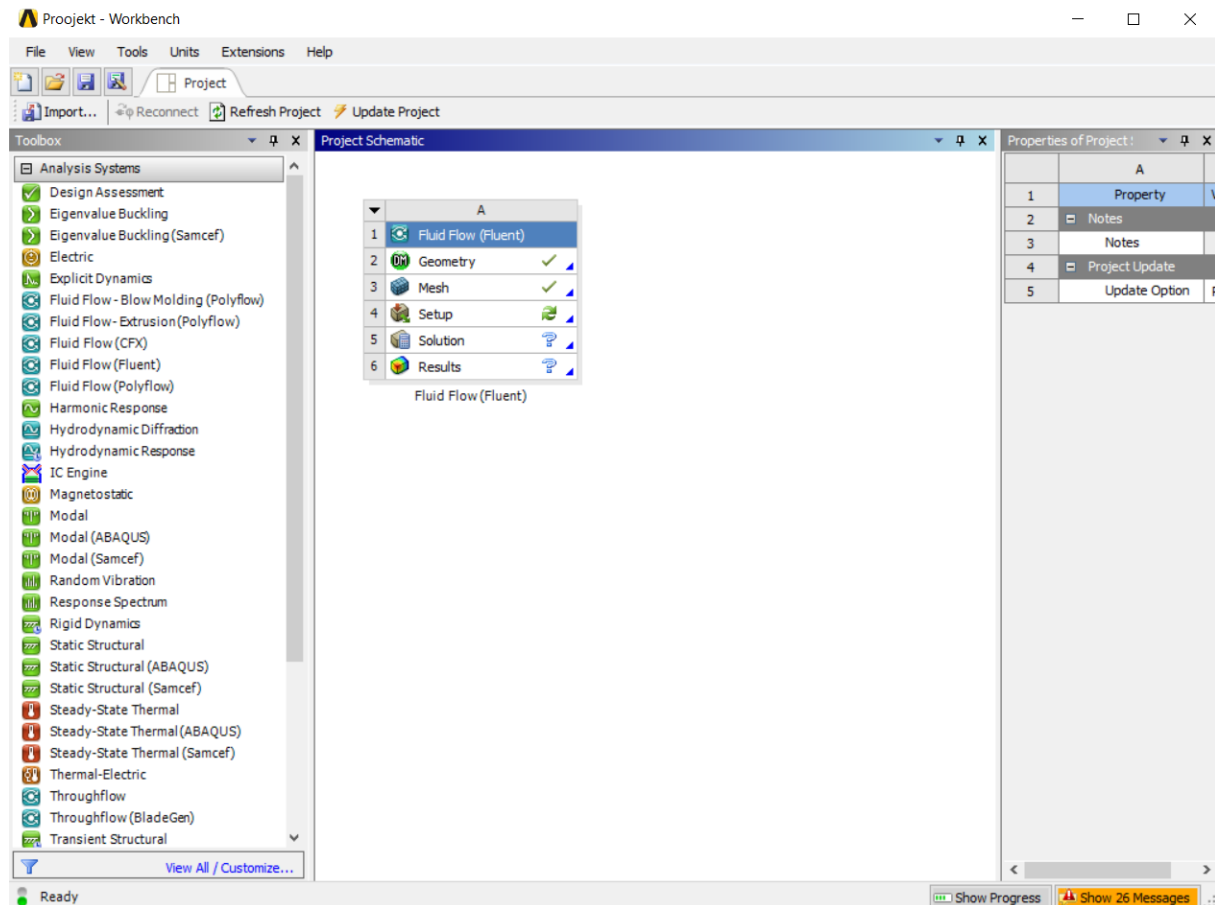
Úkolem ideální simulace chlazení akumulátoru by, zjednodušeně řečeno, mělo být co nejpřesnější zobrazení podstatných dějů ve sledovaném prostoru. Toho lze dosáhnout například časově proměnnou simulací proudění vzduchu a tepelné výměny mezi vzduchem a články v akumulátoru. Jedna z možných konfigurací takové simulace je například aproximace generování tepla bateriovými články podle reálných jízdních dat a implementace této aproximace do simulační aplikace. Po nastavení parametrů proudění vzduchu by pak bylo možné v reálném čase sledovat zahřívání jednotlivých míst akumulátoru. Taková simulace by však byla nejen velmi náročná na zjištění správných vstupních parametrů a jejich implementaci, ale zejména na samotný výpočetní čas. Tato simulace by nemohla být realizována na klasickém stolním počítači, ale bylo by nutné využít specializovaných výpočetních serverů. Proto je v této práci nutné přistoupit k takovým zjednodušením, které povedou především k eliminaci požadavku na simulaci časového průběhu oteplení akumulátoru. S dostupným hardwarem by simulace jedné vteřiny takového děje pro tělesa s jednoduchou geometrií trvala zhruba jeden den, což je neúnosně dlouhá doba.

3.1.1. Současná metodika měření teplot akumulátoru

Teplota se v akumulátoru sedmé generace měří pomocí NTC odporů, umístěných na BMS v kontejneru akumulátoru. Tyto termistory měří teplotu na polovině všech použitých článků, tedy celkem na 432 člancích. Okamžitá teplota na všech termistorech se zaznamenává každých 13 vteřin. Tato perioda je dána kompromisem mezi přesností zaznamenaných dat a měrou využití CAN sběrnice, která je pro sběr dat ve vozidle používána a její přenosová kapacita je omezená.

3.1.2. Softwarové nástroje pro zpracování tepelné simulace

Pro uskutečnění simulace byl vybrán program Ansys, konkrétně jeho modul Fluent, který je v rámci týmu používán pro simulaci a vývoj aeropaketu vozidla. Ansys je vyvíjen americkou společností Ansys Inc. jako soubor programů pro inženýrské simulace. Software je používán pro vývoj produktů, polovodičů a simulací, které ověřují odolnost produktu, rozložení teploty, pohyb kapalin či plynů a elektromagnetické vlastnosti.



Obrázek č. 4: Okno programu Ansys Workbench s rozpracovaným projektem simulace v modulu Fluent

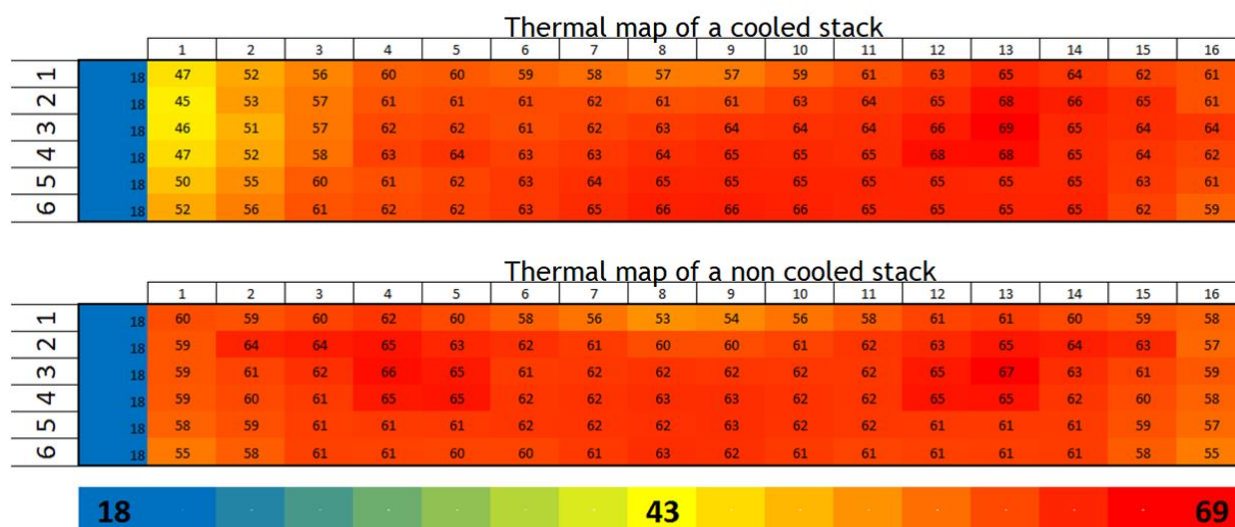
Na obrázku výše je zobrazeno okno Ansys Workbench. Tento program slouží jako výchozí prostor pro zpracování simulací, kde je možné na pracovní plochu uprostřed přidávat různé moduly simulací, na obrázku vlevo. Tyto moduly je spolu možné na pracovní ploše spojovat tak, aby se výsledky z jedné části simulace předaly do části druhé. Na obrázku zároveň vidíme postup při simulaci v modulu Fluent, sloužící pro výpočty proudění fluidních látek. Modře podbarvený je název vybraného modulu. Pod ním v jsou v tabulce postupně seřazeny jednotlivé kroky, kterými je třeba k dokončení projektu projít. Jako první je segment Geometry, ve kterém lze vytvořit vlastní geometrii zkoumaných těles, nebo importovat soubor například z některého z CAD programů. Poté je třeba zkoumaná tělesa rozdělit na konečné množství elementů pomocí segmentu Mesh. V této části lze nastavit několik důležitých parametrů sítě jako je metoda dělení těles, hranice velikosti výsledných elementů a kvalitu sítě, přičemž vyšší kvalita znamená přesnější výsledky, ale vyšší výpočetní čas. Po vygenerování lze síť analyzovat a případně dále upravovat, či přejít k dalšímu bodu. Tím je import připravených těles do výpočetního programu Fluent, který je v modulu na obrázku reprezentován částmi Setup a Solution. V segmentu Setup je potřeba nastavit parametry zkoumaného systému jako jsou například materiálové konstanty, podmínky okolí a parametry jednotlivých částí geometrie. Segment Solution se zabývá nastavením metody výpočtu, přesnosti řešení a požadovaných výstupních veličin. Po spuštění výpočtu simulace a jeho úspěšném ukončení je možné výsledky zobrazit v posledním segmentu Results. Ten slouží k zobrazení výstupů ve formě grafů, prostorových kontur nebo vektorů.

3.2. Příprava k řešení simulace

Před vlastním započítáním procesu simulace je důležité určit, jaký model bude pro simulaci použit s přihlédnutím k reálným výpočetním možnostem a jaká zjednodušení oproti skutečné situaci je třeba provést.

3.2.1. Popis zvoleného postupu simulace

Časově proměnný model proudění vzduchu a tepelné výměny v akumulátoru je velmi složitý a výpočetně náročný, proto je potřeba simulaci zjednodušit a současně zachovat co nejvíce požadovaných výstupních informací. Jako první je nutné z důvodu výpočetní náročnosti opustit požadavek na časově proměnnou simulaci. Ta by sice mohla sloužit k porovnání výstupních dat s reálnými daty testování akumulátoru, ale výpočetní náročnost této varianty momentálně vylučuje její použití. Dalším požadovaným výstupem ideální simulace je tepelná výměna mezi tělesy, jmenovitě mezi bateriovými články a okolním vzduchem. V případě časově stálé simulace je ovšem nutné definovat bateriové články jako zdroje stálého tepla. Výstupem takového výpočtu by pak byly jednak veličiny, definující proudění vzduchu, jednak ustálené rozložení teplot v akumulátoru. Je ovšem nutné posoudit užitečnost simulace stálého rozložení teploty v akumulátoru vzhledem k její náročnosti. V tomto případě je předmětem simulace akumulátor z minulé sezony, jehož životní cyklus v rámci soutěže je již u konce, a i když by podrobná znalost jeho tepelných poměrů byla zajímavá, nepřinesla by nejspíše žádné zásadní informace, které by nebyly předem známy. To ilustruje obrázek níže.

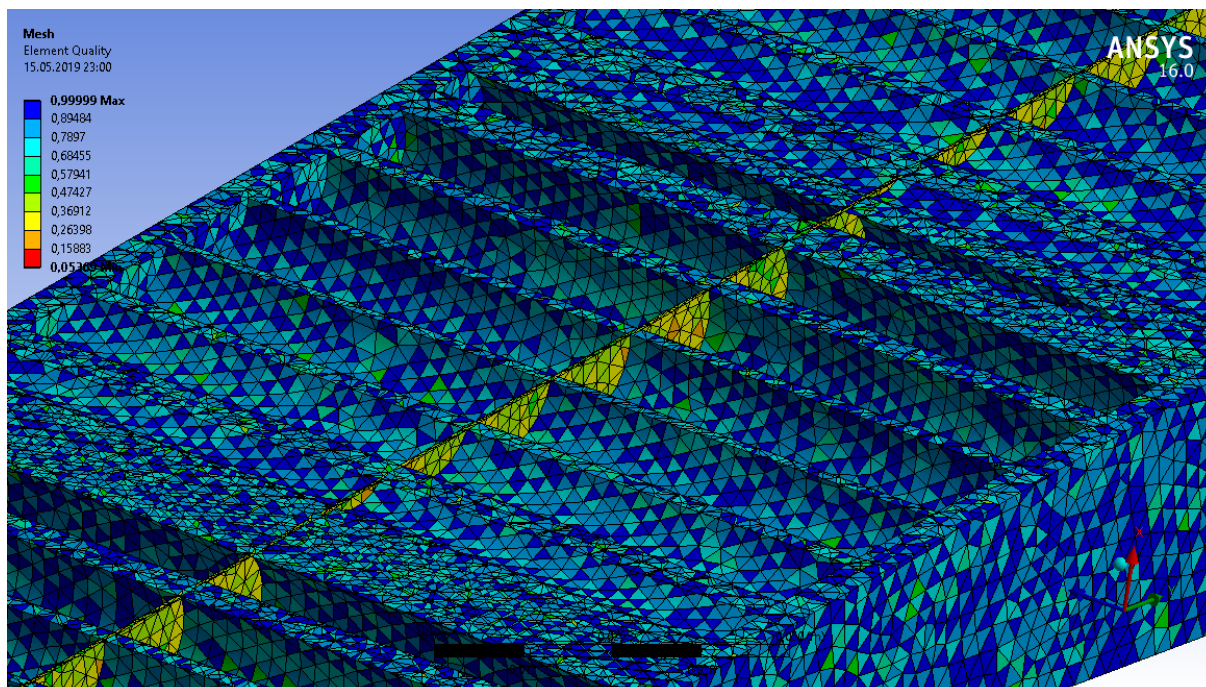


Obrázek č. 5: Porovnání rozložení teplot v akumulátoru FSE.07 při jeho zatěžování, horní mapa představuje chlazený akumulátor, dolní mapa nechlazený. [27]

Teploty se v zahřátém akumulátoru liší o jednotky stupňů a vynaložení času a úsilí na pouhé potvrzení faktu, že akumulátor se nyní chladí neefektivně by nebylo příliš účelné. Minimální rozdíl teplot mezi chlazeným a nechlazeným akumulátorem u většiny článků může pak být impulzem pro diskuzi o celkovém konceptu akumulátoru a jeho chlazení, což ale přesahuje zamýšlený rozsah semestrálního projektu. Proto se tato simulace bude zabývat pouze prouděním vzduchu. Takový kompromis zaručí výrazné snížení výpočetní náročnosti a zachování velké části výpovědní hodnoty modelu, neboť analýzou výsledků je možné získat celkový obraz poměrů v akumulátoru a identifikovat regiony, které největší měrou přispívají ke zhoršení průtoku chladícího vzduchu akumulátorem.

3.2.2. Model použitý pro simulaci a jeho rozdělení na elementární síť

Výrobní model akumulátoru formule FSE.07, který je zkoumán v této kapitole, musel být před implementací do výpočetního programu výrazně upraven. Jako první byla z modelu odstraněna tělesa, reprezentující elektroniku, včetně kabelů a AIRů v přední části akumulátoru. Tato tělesa měla velmi složitou geometrii a na výsledcích se jejich odstranění projeví minimálně. Ze stejného důvodu byl z modelu odstraněn veškerý spojovací materiál. Dále bylo potřeba zjednodušit geometrii součástí, které jsou v modelu zachovány, především se jedná o vyplnění otvorů v deskách a stěnách, vyhlazení prolisů a výčnělků například na samotných člancích a zjednodušení geometrie hran stěn a desek. Po tomto zjednodušení a několika dalších opravách byl model použit pro první simulaci, avšak výpočetní časy se pohybovaly v řádech dnů, proto bylo rozhodnuto o dalším zjednodušení modelu. Tímto zjednodušením je, v simulaci často používaná, metoda symetrie. Tato metoda spočívá v rozdělení zkoumaného tělesa jednou, dvěma nebo třemi rovinami symetrie. Tato metoda výrazně šetří čas výpočtu při zachování jeho kvality, ovšem lze ji použít pouze, pokud je zkoumané těleso opravdu symetrické. V případě akumulátoru lze s odhlédnutím od větších výstupních otvorů vzduchu v jednom sloupci celé těleso rozdělit rovinou v podélném směru uložení, ale vzhledem ke stále vysokým výpočetním časům se jako mnohem zajímavější jeví možnost využít pro simulaci pouze jeden stack, tedy jednu šestinu celkového modelu. Takové zjednodušení lze použít pouze s obětováním určité míry přesnosti, ale pro vzhled do poměrů v akumulátoru by měl postačovat. Jeho hlavní výhodou pak spočívá v tom, že je, na rozdíl od předchozích variant, realizovatelný. Rozdělení modelu na síť elementů bylo provedeno v segmentu Mesh s nastavením metody čtyřstěnnů a pokročilé funkce dělení pro zakřivenou geometrii. Kvalita vzniklé sítě byla dobrá, jak je vidět i z obrázku č. 6, kde převažuje modrá barva buněk, tudíž by neměla příliš ovlivnit samotný výpočet.



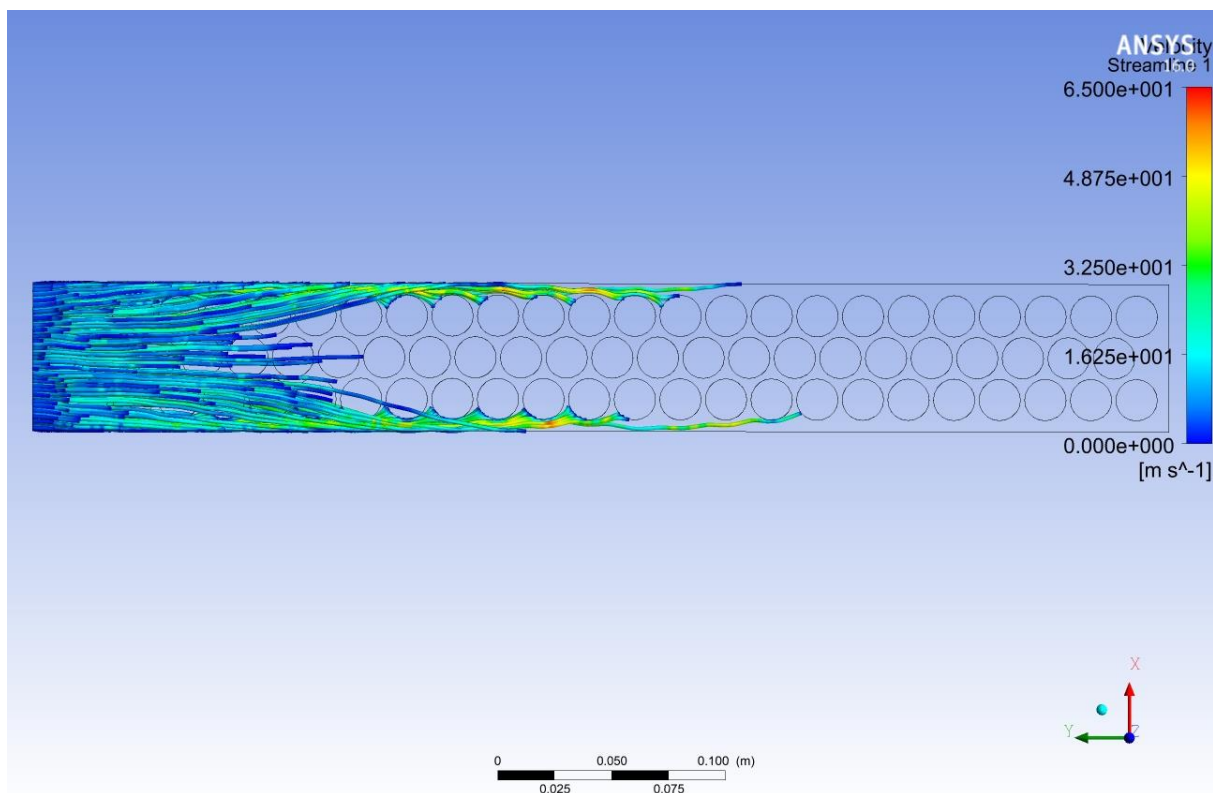
Obrázek č. 6: Detail diagonálního řezu použitým modelem, rozděleným na síť konečného počtu elementů. Barva symbolizuje kvalitu buňky, modrá je nejlepší, červená nejhorší.

3.3. Implementace modelu do výpočetního segmentu a provedení simulace

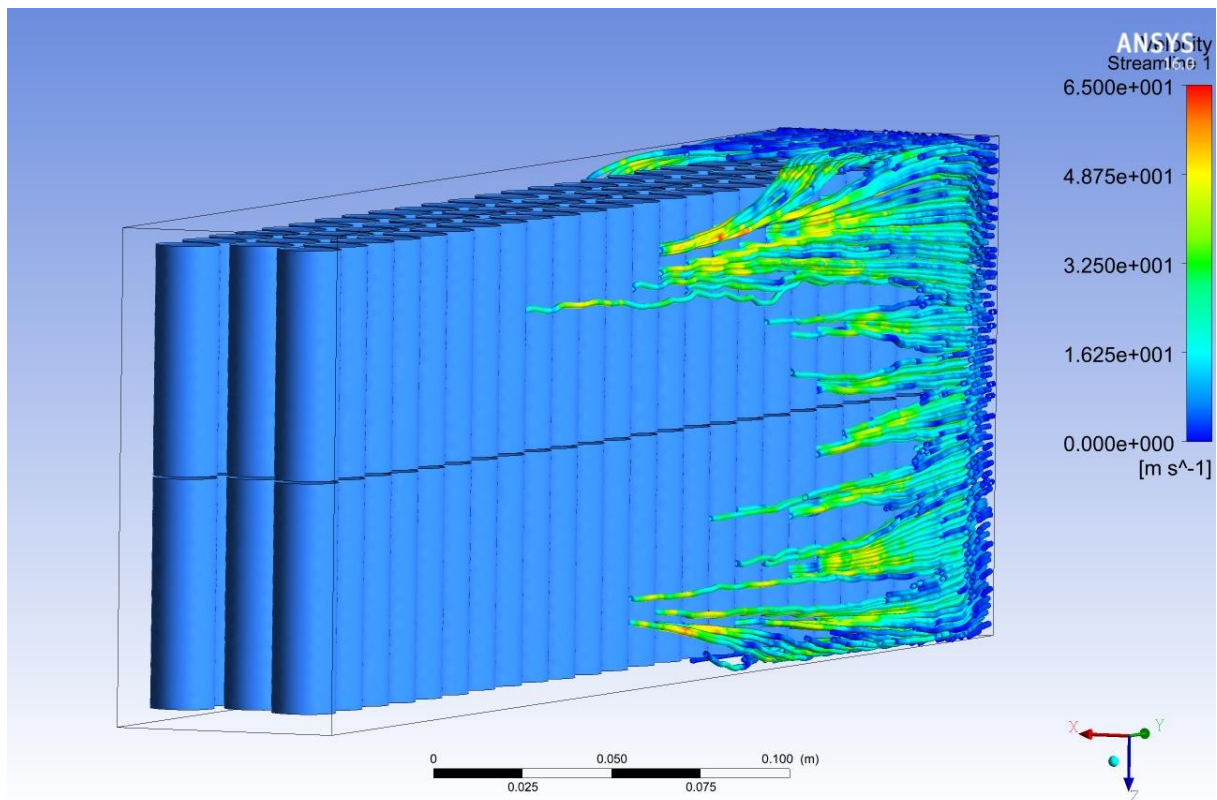
Připravená část modelu akumulátoru byla importována do segmentu Setup. Zde byl specifikován výpočetní model turbulentního proudění kapaliny, konkrétně realizovatelný model k-epsilon. Tento model je v simulacích turbulentního proudění kapalin a plynů používán velmi často. Jeho základem je řešení dvou transportních rovnic, jejichž proměnnými jsou turbulentní kinetická energie k a turbulentní rozptyl ϵ [6]. Tyto diferenciální rovnice jsou doplněny několika dalšími rovnicemi pro stanovení hodnoty veličin, vyskytujících se v hlavní dvojici rovnic. Vzhledem k jejich složitosti není uvedení plného znění rovnic v této práci příliš relevantní. Po importu byly definovány podmínky na rozhraní. Pro první simulaci byla rychlost vstupního vzduchu nastavena na hodnotu 10 m/s, výstupní otvory byly definovány jako odtok vzduchu. Po inicializaci byl spuštěn výpočet řešení o 1 200 iteracích.

3.4. Výstup výpočetního programu pro simulaci akumulátoru FSE.07

Výstupem provedeného výpočtu mohou být jak číselně, tak graficky zobrazené údaje o velikosti sledovaných veličin. Pro tuto simulaci je nejdůležitější sledovanou veličinou rychlost proudícího vzduchu, kterou je možno v segmentu Solution graficky zobrazit. Nejvíce vypovídající metodou pro tento případ je zobrazení proudnic, které poskytuje informaci o směru a rychlosti proudění vzduchu. Toto zobrazení je v několika pohledech zachyceno na obrázku č. 7 a 8.



Obrázek č. 7: Výstup simulace proudění vzduchu stackem akumulátoru FSE.07, pohled shora



Obrázek č. 8: Výstup simulace proudění vzduchu stackem akumulátoru FSE.07 se zobrazenými stěnami článků

Obrázek č. 7 znázorňuje vrchní pohled na stack akumulátoru s naznačenými hranicemi stěn a proudnicemi, které jsou výstupem výpočetního segmentu. Ty jsou barevně odlišeny podle rychlosti proudění vzduchu v daném místě. Obrázek č. 8 zachycuje pohled na tentýž objekt, nyní v levém horním pohledu. Navíc jsou zde pro přehlednost zobrazeny stěny bateriových článků. Z těchto vizualizací lze vyvodit, že většina chladícího vzduchu, který proudí stackem, je vytlačována hlavně do stran, případně nad a pod články. Vzduch, který proudí mezi články, přestává efektivně proudit asi u páté řady článků z celkových dvaceti čtyř. Vzduch, který proudí na bocích článků, dosahuje zhruba k patnácté řadě.

3.4. Zhodnocení provedené simulace akumulátoru

Analýza požadavků na výstup simulace, dostupné výpočetní kapacity a odhadovaných výpočetních časů různých modelů ukázala, že pro simulaci je nutné použít vícero zjednodušení jak zkoumané geometrie, tak simulačního modelu. Jako program pro zpracování simulace byl použit Ansys, konkrétně modul Fluent. Výkres výrobní geometrie akumulátoru byl zjednodušen, rozdělen na šest stejných objemů a do výpočetního programu byla importována jedna tato šestina. Zkoumané jevy bylo nutné zjednodušit na simulaci proudění chladícího vzduchu v akumulátoru. Lze říci, že tato simulace byla úspěšná, jelikož potvrdila nízkou efektivitu chlazení akumulátoru sedmé generace. Výsledek zhruba odpovídá měření teplot akumulátoru, zobrazeném na obrázku č. 5. Zároveň je ale nutné mít na paměti, že celý akumulátor se skládá ze šesti stacků a dalších komponentů a prázdných prostor, tudíž se proudění vzduchu ve skutečném akumulátoru bude od simulace poněkud lišit, zejména je velmi pravděpodobné, že část chladícího vzduchu bude proudit v prostoru mezi víkem kontejneru a stacky.

4. Analýza finanční náročnosti konstrukce akumulátoru FSE.07

Simulace tepelného zatížení není jediný způsob, jakým lze optimalizovat akumulátor formule. Další možností je analýza nákladů výrobního procesu akumulátoru. Již samotné provedení takové analýzy může zvýšit bodový zisk v disciplíně Cost and Manufacturing, nepřímo pak optimalizace nákladů pomůže týmu snížit finanční náročnost konstrukce akumulátoru a umožní využít uvolněné finanční prostředky v jiných oblastech.

4.1. Náklady vzniklé během výrobního procesu akumulátoru

Výrobní proces akumulátoru lze rozdělit na dvě hlavní fáze. První fází je návrh, kdy hlavní část nákladů představuje lidská práce. Navrhování sestává především z konceptních schůzí, rešerší a vyhodnocení provozu akumulátoru v minulé sezoně. V této části jsou také vybrány komponenty, ze kterých bude akumulátor sestaven. Poté následuje kreslení celého vozu včetně výrobního modelu akumulátoru v CAD programu CATIA. Dalším krokem je nákup vybraných komponentů, což v sobě zahrnuje samotnou cenu výrobků a ostatní ceny jako jsou doprava a pojištění zboží, jak lze vidět v tabulce níže.

Tabulka č. 5: Ceny niklu a mědi pro výrobu akumulátoru FSE.07 [28]

Popis	Cena [Kč]	Sazba DPH	DPH [Kč]	Cena vč. DPH [Kč]
Alloy 201 pásek ve svitku 0,2 x 200 mm, 9 m	13 013,50	21 %	2732,84	15 746,34
Dopravné, balné, pojistné, atest	2602,70	21 %	546,57	3 149,27
Cu 99,99 % pásek ve svitku, 0,25 x 305 mm, 7 m	35 136,45	21 %	7 378,65	42 515,10
Dopravné, balné, pojistné	520,54	21 %	109,31	629,85

Samotná výroba akumulátoru se dělí na část mechanickou, to je hlavně sestavení akumulátorového kontejneru, pálení, svařování plechů a bateriových článků a část elektronickou, sestávající z výroby a programování desek plošných spojů, které jsou součástí akumulátoru. Hlavními náklady výroby jsou lidská práce, spotřební materiál a režie. Celá výroba akumulátoru se odehrává v dílně, zapůjčené fakultou elektrotechnickou, která si za užívání místnosti neúčtuje žádný nájem. V rámci snahy o korektní určení nákladů by ovšem výše režijních nákladů měla být zahrnuta do výpočtu.

4.2. Specifika definování ekonomických ukazatelů v prostředí týmu studentské formule

Výroba vozu pro soutěž Formula Student má určitá specifika, která je nutno při stanovení nákladů na výrobní proces uvažovat. Jednou z nich je životnost vyrobeného monopostu. Vyrobený vůz se podle pravidel může účastnit soutěže pouze jednu sezonu ^[4], poté jeho životnost pro závody končí. Poté je většinou odstaven na fakultě, nebo se účastní některých propagačních akcí. Výroba formule nemá za úkol generovat příjmy a vítěz závodu nemá nárok na žádnou finanční či jinak hodnotnou cenu, tudíž se pro tento primární účel jedná o ztrátovou výrobu. Jako příjmy by bylo možné uvažovat sponzorské dary, k jejichž získání přispěla účast vozu na propagačních akcích týmu anebo jeho případné dobré výsledky v samotné soutěži. Tým získává finanční prostředky na své fungování jednak finančním darem, který poskytuje děkan pro účely propagace FEL a týmu eForce FEE Prague pomocí reklamních předmětů ^[8], jednak právě pomocí sponzorských smluv. Ty jsou uzavírány s relevantními firmami v oboru, které týmu poskytují většinou kredit na nákup jejich zboží či služeb.

Velkou část nákladů uvedených v rozboru výše tvoří náklady na lidskou práci. Všichni členové týmu se ale výroby vozu účastní dobrovolně a nepožadují za svou práci žádnou finanční kompenzaci, tudíž neexistují ani přesné záznamy o množství odpracovaných hodin. Tyto náklady tedy bude nutné určit pouze přibližně, k čemuž je potřeba odhadnout množství času, které pracovník věnuje výrobě a ohodnotit jednu hodinu této práce. K hodnocení budou využity statistické údaje Ministerstva práce a sociálních věcí o výši mezd v různých oborech.

4.3. Přehled obsahu souboru přílohy

Výpočet nákladů na výrobu akumulátoru je proveden v přiloženém souboru, vytvořeném v programu Excel. Ten obsahuje několik listů. Prvním je list Procesy, kde se nachází výčet všech položek, potřebných k výrobě akumulátoru. Položky jsou rozlišeny na výrobní procesy a potřebné materiály, poté je uveden druh činnosti či materiálu a popis každé položky. Položky jsou uspořádány v jednotlivých funkčních celcích, kterými jsou součástky nebo jejich sestavy. U každé položky je uveden počet kusů či opakování a přiřazena váha. Jedná se o číselný údaj, který u materiálů vyjadřuje, kolik jeho jednotek bylo použito, u procesů pak kolik času bylo na jeho dokončení potřeba. Na základě váhy, počtu kusů a ceny za jednotku procesu či materiálu je pak určena částka, která odpovídá nákladům položky.

Záložka Oddělení obsahuje přehled všech aplikovaných pracovních procesů pro výrobu a výpočet jejich nákladů. Ty se skládají ze mzdy pracovníků, spotřebního materiálu a osobních potřeb jako rukavice, hadry a ochranné pomůcky. Celkové náklady jsou vztaženy k základnímu časovému bloku práce, kterým je vždy jedna hodina. Zdrojem mezd jsou údaje na dalším listu s názvem Práce. Zde je uvedena přehledná tabulka s jednotlivými profesemi, které se na výrobě podílejí. K těm je přiřazena jejich hodinová hrubá a superhrubá mzda na základě dat MPSV ^[16].

List Materiál obsahuje údaje z faktur za přijatý materiál a služby, společně s cenami materiálu a služeb, které byly převzaty z ceníků dodavatelů. V případě dalších nákladů jako doprava či pojištění jsou tyto poměrně rozděleny k příslušným položkám. V následujícím listu Režijní náklady jsou provedeny odhady nákladů na pronájem dílny, vodné, stočné, elektřinu a plyn. Na listu Citlivostní analýza se nachází tabulka, kde jsou zaneseny náklady procesů pro uvažované úrovně platového ohodnocení pracovníků. Všechny scénáře citlivostní sestavy je možné přímo v souboru přílohy zobrazit na listu Práce pomocí správce scénářů. Tyto tabulky se nachází také dále v textu pod č. 14 a 15. List Zhodnocení pak obsahuje celkové náklady na výrobu akumulátoru, náklady procesů, materiálové náklady a příslušné grafy. Všechny tyto údaje se rovněž nacházejí dále v textu práce.

4.4. Náklady na výzkum a vývoj

Návrh akumulátoru a potažmo i celé formule v tomto ročníku probíhal zhruba od září do konce ledna. Jak již bylo zmíněno výše, v této fázi výroby by v rozboru nákladů vynikla hlavně cena lidské práce, případně náklady na softwarové licence, další administrativní náklady a režie. Snaha o vyčíslení nákladů na toto období by ovšem narazila na problém dostatečně přesného odhadu člověkohodin. Na návrhu akumulátoru má podíl jak mechanická, tak elektrická skupina a počet participujících členů týmu je větší než u jiných jednotek. Zároveň je prakticky nemožné rozdělit vývoj na jednotlivé procesy a přiřadit jim přesnou časovou dotaci tak, aby měl výsledek užitečnou vypovídací hodnotu. Pravidla soutěže FSG rovněž říkají, že výpočet ceny vozidla nesmí obsahovat náklady na výzkum a vývoj^[4]. Z těchto důvodů nebudou v této práci náklady fáze vývoje akumulátoru zohledněny.

4.5. Vznikající režijní náklady a jejich výše

Výroba akumulátoru je realizována převážně v prostorách dílny, která byla k tomuto účelu zapůjčena fakultou. Aby zde byly zajištěny přijatelné pracovní podmínky, je nutno udržovat v dílně přijatelnou teplotu a zajistit přívod a odvod vody. Voda je napojena na síť společnosti Pražské vodovody a kanalizace, a.s., vytápění je zajištěno centrálně zemním plynem. Distributorem plynu a elektřiny byla pro účely této práce zvolena společnost PRE, a.s. Součástí režijních nákladů by, jak bylo řečeno výše, mělo být i určení ceny pronájmu výrobních prostor. Žádný z těchto nákladů tým přímo nehradí a v kontextu cíle práce, tedy zlevnění výroby akumulátoru, tak nehrají žádnou roli, přesto bude pro ilustraci proveden co nejpřesnější výpočet jejich předpokládané výše.

4.5.1. Cena pronájmu dílny

Pro výpočet je nejprve nutné určit na základě dostupných informací co nejpřesněji předpokládanou cenu pronájmu uvažované dílny, vyjádřenou v měsíční ceně za metr čtvereční. Tuto částku bude pak možné aplikovat na daný prostor o rozloze 340 m² a takto vzniklou měsíční cenu pronájmu násobit časem, který je potřeba k vyrobení akumulátoru. Tento čas byl na základě zkušeností z předchozích let a plánu práce v letošní sezóně stanoven jako čtyři měsíce, tedy zhruba 120 dní. Je předpokládáno, že výroba ostatních částí monopostu probíhá současně a trvá stejně dlouho, není tedy třeba uvažovat delší dobu pronájmu.

Jelikož z konzultace s tajemníkem fakulty vyplynulo, že v případě dlouhodobého pronájmu halové laboratoře by byla vypracována individuální cenová nabídka a neexistuje orientační ceník pronájmů, musela být předpokládaná cena nájmu této dílny na jeden metr čtvereční určena na základě rešerší nabídky pronájmu dílenských prostor v Praze. Přitom bylo přihlédnuto k několika faktorům, ovlivňujícím tuto cenu, především k poloze objektu, jeho technickému stavu a vybavenosti. Výpočet celkové ceny pronájmu je zachycen v tabulce č. 6.

Tabulka č. 6: Výpočet ceny pronájmu dílny

Pronájem dílny		
Měsíční cena za m ²	220	Kč
Velikost objektu	340	m ²
Celkem za měsíc	74 800	Kč
Předpokládaná doba výroby	4	měsíce
Náklady za výrobní periodu	299 200	Kč

Zde je vidět, že cena pronájmu výrobních prostor na jeden měsíc činí 74 800 Kč, celkové náklady pronájmu na celou výrobní periodu, tedy projektovaných 120 dní, jsou rovny 299 200 Kč.

4.5.2. Cena vodného a stočného

Při určení platby za vodné a stočné je cena přesně definována dodavatelem, nepřesnosti však mohou nastat při odhadu spotřeby vody. Nejprve je ovšem nutné definovat pojmy vodné a stočné. Vodné je úplatou za pitnou vodu a za službu spojenou s jejím dodáním^[13], stočné je úplatou za službu spojenou s odváděním, čištěním, nebo jiným zneškodňováním odpadních vod^[13]. V tomto případě je možné pro jednoduchost uvažovat, že množství vypouštěných odpadních vod není měřeno a předpokládá se, že odběratel, který odebírá vodu z vodovodu, vypouští do kanalizace takové množství vody, které odpovídá zjištění na vodoměru^[13]. Výpočet platby za vodné a stočné je možno sledovat v tabulce č. 7.

Tabulka č. 7: Výpočet ceny za vodné a stočné

Cena vody a kanalizace		
Voda pitná	48,96	Kč/m ³
Voda odvedená (stočné)	40,70	Kč/m ³
Celkem:	89,66	Kč/m ³
Denní spotřeba na osobu cca	46	l
Přítomno denně cca	5	osob
Celková denní spotřeba vody	230	l
Spotřeba za 1 výrobní periodu	27 600	l
Cena vodné a stočné celkem	2 475	Kč

Zde byla dle ceníku PVK určena cena vodného, stočného a jejich součet. Dále byl proveden odhad denní spotřeby vody pro jednu osobu na základě statistických dat^[14], která byla upravena tak, aby co nejlépe reflektovala realitu. Při odhadovaném průměru přítomnosti pěti lidí na dílně denně pak denní spotřeba vody činí 230 litrů, což se rovná cca. 27 tisícům litrů neboli 27 m³ vody za 120 dní. Při těchto datech je celková platba za jednu výrobní periodu rovna částce zhruba 2474 Kč.

4.5.3. Cena zemního plynu pro vytápění

Spotřebu zemního plynu pro vytápění dílny lze bez většího množství výpočtů odhadnout velmi těžko. Proto byla výchozím údajem výše měsíční spotřeby asi 2,45 MWh, která byla odhadnuta v rámci výpočtu spotřeby zemního plynu pro dokument Cost report. Pokud by byla cena za zemní plyn skutečně týmu účtována, mohla by být její výše určena pomocí plynoměru, instalovaného před vstupem plynu do objektu dílny, nebo s větší pravděpodobností poměrným rozdělením celkové spotřeby objektu halových laboratoří či školy. Cena zemního plynu byla v tomto výpočtu určena dle ceníku společnosti PRE^[25]. Její složky a celková výše jsou uvedeny v tabulce č. 8.

Tabulka č. 8: Cena zemního plynu pro vytápění dílny a její složky

Cena plynu		
tarif	15-25	MWh/rok
cena za odebraný plyn	0,8	Kč/kWh
stálý měsíční plat	104,5	Kč/měsíc
cena za distribuci	0,2	Kč/kWh
měsíční plat za kapacitu	116,7	Kč/měsíc
průměrná měsíční spotřeba	3 269	kWh
Celkem za měsíc	3 467	Kč
Celkem za výrobní periodu	13 869	Kč

4.5.4. Cena elektřiny

Výše platby za elektřinu v uvažované dílně bude závislá na výši spotřeby a použité sazbě. Vzhledem k umístění objektu na území Prahy je uvažován ceník elektřiny pro podnikatele společnosti PRE. Celková měsíční platba je zde definována jako součet ceny za spotřebovanou elektřinu, platby za odběrné místo, ceny za příkon podle velikosti hlavního jističe před elektroměrem, ceny za činnost operátora pro odběrné místo a příspěvku na obnovitelné zdroje ^[15].

Tabulka č. 9: Cena elektřiny, spotřebované při výrobě akumulátoru

Cena elektřiny		
měsíční spotřeba cca	0,74	MWh
Cena za silovou elektřinu	5 215	Kč/MWh
Měsíční platby	148	Kč
Měsíční podpora OZE	366	Kč
Celkem za měsíc	4 373	Kč
Celkem za výrobní periodu	17 493	Kč

Spotřeba elektřiny byla určena jednak odhadem základní spotřeby při užívání dílny, to zahrnuje osvětlení, počítače a lednici, jednak odhadem spotřeby nářadí a strojů, použitých pro výrobní procesy akumulátoru, jmenovitě vrtačky, svářečky, páječky, pily a vývěvy pro laminování. Takto byla měsíční spotřeba elektřiny přibližně určena jako 0,74 MWh. V tabulce č. 9 jsou pak uvedeny jednotlivé složky platby za elektřinu dle ceníku PRE ^[15].

4.5.5. Shrnutí provedeného výpočtu režijních nákladů

V této podkapitole byly určeny režijní náklady výroby akumulátoru a jejich výše. Do režijních nákladů byl započítán pronájem dílny, spotřeba vody, elektřiny a zemního plynu na vytápění. Výši těchto nákladů bylo nutné ve všech případech odhadnout, protože neexistují data, ze kterých by bylo možné vyjít a jejich zjišťování by přesahovalo rámec této práce. Z částek, které se podařilo určit, vyplývá, že nejvíce by rozpočet byl zatěžován cenou pronájmu dílny, která by na celou výrobní periodu činila 299 200 Kč. To dalece převyšuje předpokládané náklady na práci a materiál pro výrobu jednoho akumulátoru. Na závěr je nutné zdůraznit, že z pohledu samotného týmu tyto náklady vůbec nevznikají a jejich snížení tak nebude mít na celkovou cenu akumulátoru žádný vliv, proto je dostačující odhad zde provedený.

4.6. Náklady sériové a prototypové výroby

Jednou z možností pro vypracování tohoto ekonomického hodnocení bylo uvažování případu sériové výroby akumulátoru, potažmo celého monopostu. Vzhledem k úkolu této práce, tedy nalezení možností pro snížení ceny akumulátoru, však bylo od tohoto záměru upuštěno. Vytvoření modelu výroby vozu v sérii by k reálnému zlevnění akumulátoru nejspíše nevedlo.

Princip sériové výroby spočívá v produkci velkého množství výrobků, jejichž výrobní postupy jsou přesně známy. Tím je možné zrychlit jejich produkci například automatizací určitých výrobních procesů jako vrtání nebo řezání. Naopak prototypová výroba probíhá většinou jako produkce jednotek výrobků – prototypů. Výrobní proces takového experimentálního výrobku není většinou dobře znám a velká část výroby je manuální.

Zavedením sériové výroby lze docílit nižších výrobních nákladů jednoho kusu, protože vlivem velkého objemu produkce je možné rozpustit režijní náklady, jako jsou pronájem výrobních prostor, údržbu strojů a náklady na provoz nevýrobních oddělení firmy, mezi větší množství výrobků. Na rozdíl od převážně manuálně vyráběných prototypů je zde větší prostor pro automatizaci výroby, což může rovněž vést k dalším úsporám.

4.7. Ohodnocení práce v jednotlivých odděleních

Procesy, z nichž se skládá výroba akumulátoru, zahrnují několik různých pracovních činností. Těm je pro co nejnějnější stanovení ceny výroby nutno přiřadit různé ohodnocení, odpovídající reálným mzdám příslušných profesí. Vzhledem k charakteru prototypové výroby je nutné zaměstnávat pracovníky s vyšší kvalifikací či zkušenostmi, kteří budou nejspíše požadovat vyšší mzdu, než je medián v oboru. Proto jsou ve výpočtu uvažovány všechny platy ve výši třetího kvartilu oboru, tedy hodnoty, nad kterou leží 25 % nejvyšších hodnot sledovaného znaku ^[16].

Tabulka č. 10: Hodinové mzdy pro jednotlivé profese, podílející se na výrobě

Výpočet hodinové mzdy jednotlivých oddělení	Hrubá hodinová mzda	Superhrubá hodinová mzda
Profese	Q3 [Kč]	Q3 [Kč]
Svářeč kovů	218	292
Strojírenský dělník montážní	202	271
Seřizovač a obsluha konvenčního stroje na vrtání	218	292
Seřizovač a obsluha konvenčního stroje na řezání	218	292
Strojní zámečník	196	263
Elektrotechnik	300	402

V tabulce výše je možno vidět profese, které se na výrobě akumulátoru podílí a ohodnocení jedné hodiny jejich práce podle dat Ministerstva práce a sociálních věcí. Z pohledu týmu jako zaměstnavatele pracovníků je důležitá superhrubá mzda, tedy součet hrubé mzdy a povinných odvodů na zdravotní a sociální pojištění, které činí 9 % a 25 % z výše hrubé mzdy, dohromady tedy 34 % ^[17]. Stejně jako dříve uvažované režijní náklady, ani zde vypočtenou mzdu tým svým členům nevyplácí. Rozdílná výše mezd však do jisté míry vypovídá o náročnosti dané činnosti a může na ni být nahlíženo jako na určitou váhu uvažovaného procesu, proto bude mzda zahrnuta do celkového výpočtu ceny výroby akumulátoru.

4.8. Určení nákladů na materiál

Cena použitého materiálu byla zjištěna několika způsoby. V tom nejjednodušším případě byly k dispozici faktury od dodavatele daného materiálu. Takto byla určena například cena kompozitních materiálů, bateriových článků, tkaniny FR4, dodaného niklu a mědi a jejich řezání. V případech, kdy faktury nebyly k dispozici, byla cena určena podle dostupných ceníků dodavatelů materiálu. Takto byly určeny například ceny spojovacího materiálu, ventilátorů, oceli a produktů pro lepení. Zvláštní položkou jsou elektrické součástky pro pájení na desky plošných spojů a samotné desky. Pro cenu těchto materiálů existují podklady pouze ve formě celkového rozpočtu elektrické skupiny týmu, ve kterém je možné najít celkovou cenu nákupu součástek pro akumulátor. Pro výpočet ale bylo nutné zjistit jednotkovou cenu součástky, což je v tomto případě cena průměrná. Ta ale, vzhledem k rozpětí ceny součástek, nemá velkou vypovídací hodnotu, proto je nutné uvažovat elektronické součástky spíše jako celek, jehož cena známa je. Ve všech případech je do ceny materiálu započítána daň z přidané hodnoty, kterou tým při nákupu materiálu zaplatí, o další účetní operace se pak stará pouze fakulta. Pokud by ovšem byla uvažována varianta komerční výroby, například pro byznysplán v soutěži FSG, stal by se tým plátcem DPH a v takovém případě by si mohl nárokovat odpočet DPH.

4.9. Přiřazení váhy jednotlivým procesům

Určení váhy jednotlivých položek procesů je odlišné pro materiály a pro procesy. V prvním případě se jedná o množství spotřebovaného materiálu v daném kroku, vyjádřené jako poměrná část tohoto množství vzhledem k jednotce materiálu. Tou může být například metr, kilogram nebo metr čtvereční. U procesů je váha určena jako časová náročnost tohoto procesu, vyjádřená opět jako poměrná část potřebného času k základnímu bloku práce, kterým je vždy jedna hodina. Konkrétní hodnoty časové náročnosti byly zjištěny osobní konzultací členů týmu, kteří se na výrobě podíleli. Je však třeba mít na paměti, že se stále jedná o odhad, tudíž mohou v tomto bodě vzniknout odchylky od reálné ceny.

4.10. Celkové náklady výroby akumulátoru

Předešlými výpočty byly zjištěny celkové náklady na výrobu jednoho akumulátoru. Ty sestávají z nákladů procesů, materiálových nákladů a režie.

4.10.1. Výše celkových nákladů na výrobu akumulátoru a její složky

Výše celkových nákladů je zaznamenána v tabulce č. 9. V ní je možno vidět, že režijní náklady tvoří asi polovinu celkových nákladů na výrobu, i když ve skutečnosti z pohledu samotného týmu vůbec nevznikají. Proto je při snaze o snížení nákladů nutno uvažovat hlavně náklady na procesy a materiály, jejichž optimalizací je možné docílit skutečných úspor.

Tabulka č. 11: Celkové náklady na výrobu akumulátoru

Celkové náklady na výrobu akumulátoru	
položka	částka [Kč]
Náklady procesů	128 019
Cena materiálu	188 224
Režijní náklady	333 036
Celkem	649 279

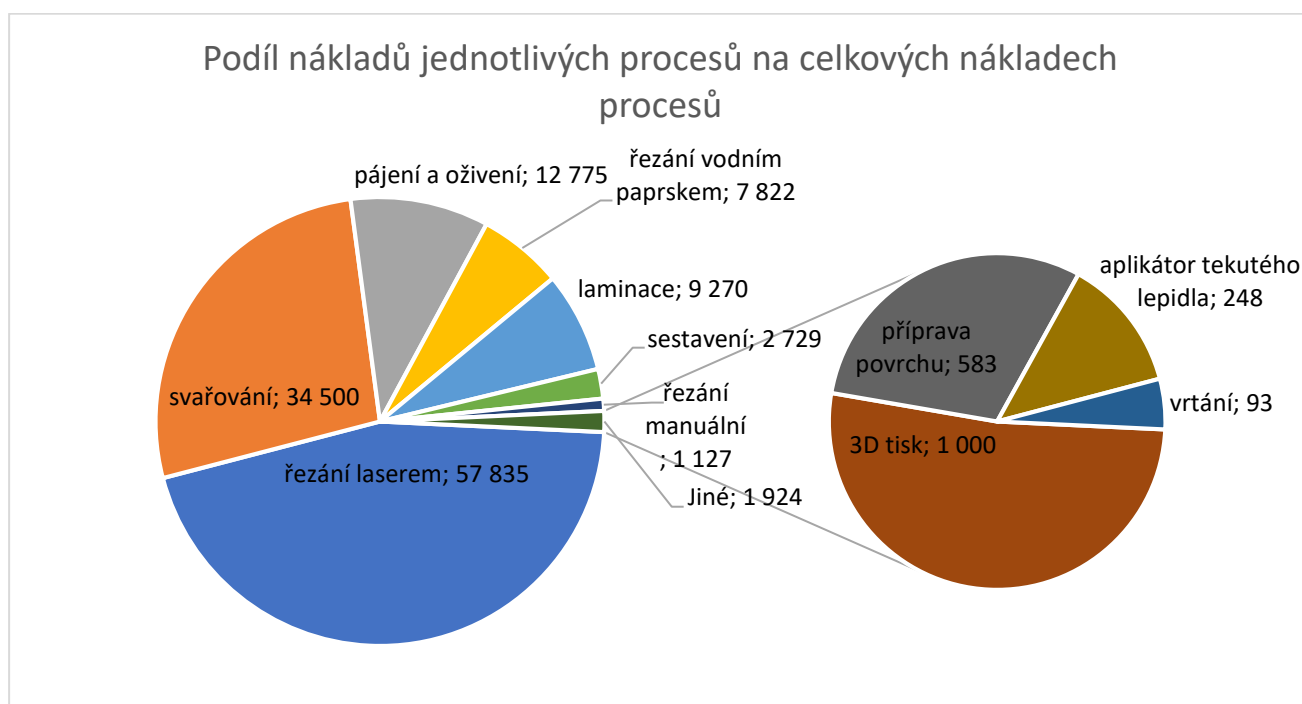
Vysoké režijní náklady jsou způsobeny hlavně uvažovaným pronájemem dílny, jehož celková cena činí 299 200 Kč, tedy něco přes 89 % všech režijních nákladů. Z pohledu týmu nemá tato položka velký význam, pro fakultu, potažmo školu, však může tato částka představovat výši opportunity cost. Za předpokladu, že nejsou známy žádné plány na využití dílny, které by přinesly škole vyšší výnosy, je pronájem dílny další nejlepší možností, jak prostory z ekonomického hlediska využít. Všechny procesní a materiálové náklady jsou náklady variabilními.

4.10.2. Detailní pohled na náklady procesů

Pro podrobnější vhled do cenových poměrů výroby akumulátoru byly výrobní náklady procesů rozděleny podle jednotlivých vykonávaných činností. Toto rozdělení a náklady jednotlivých položek jsou obsahem tabulky č. 12. Položky jsou seřazeny podle ceny od nejvyšší po nejnižší. Na prvních dvou místech v tabulce jsou činnosti, spojené se zpracováním kovů, tedy řezání laserem a svařování. Graficky jsou poměry mezi náklady procesů znázorněny na obrázku č. 9. Zde je vidět, že řezání laserem spolu se svařováním tvoří zhruba tři čtvrtiny všech procesních nákladů. Jejich optimalizace by tak měla na celkovou cenu významný dopad. Řezání laserem bylo realizováno u externího dodavatele, zatímco svařování bylo realizováno členy týmu přímo v dílně. Třetinu hodinové ceny svařování tvoří uvažované náklady na mzdové ohodnocení zaměstnance, další dvě třetiny pak skutečně vznikající náklady, jako jsou plnění tlakové lahve argonem pro svařování a cena ochranných prostředků. V případě řezání laserem lze cenu významně ovlivnit pouze výběrem dodavatele.

Tabulka č. 12: Ceny jednotlivých druhů procesů

Procesy	
položka	náklady [Kč]
Řezání laserem	57 835
Svařování	34 500
Pájení a oživení	12 775
Řezání vodním paprskem	7 822
Laminace	9 270
Sestavení	2 729
Řezání manuální	1 127
3D tisk	1 000
Příprava povrchu	583
Aplikátor tekutého lepidla	248
Vrtání	93
Instalace spojovacího materiálu	36
Celkem	128 019



Obrázek č. 9: Graf podílu cen procesu na celkové ceně procesů

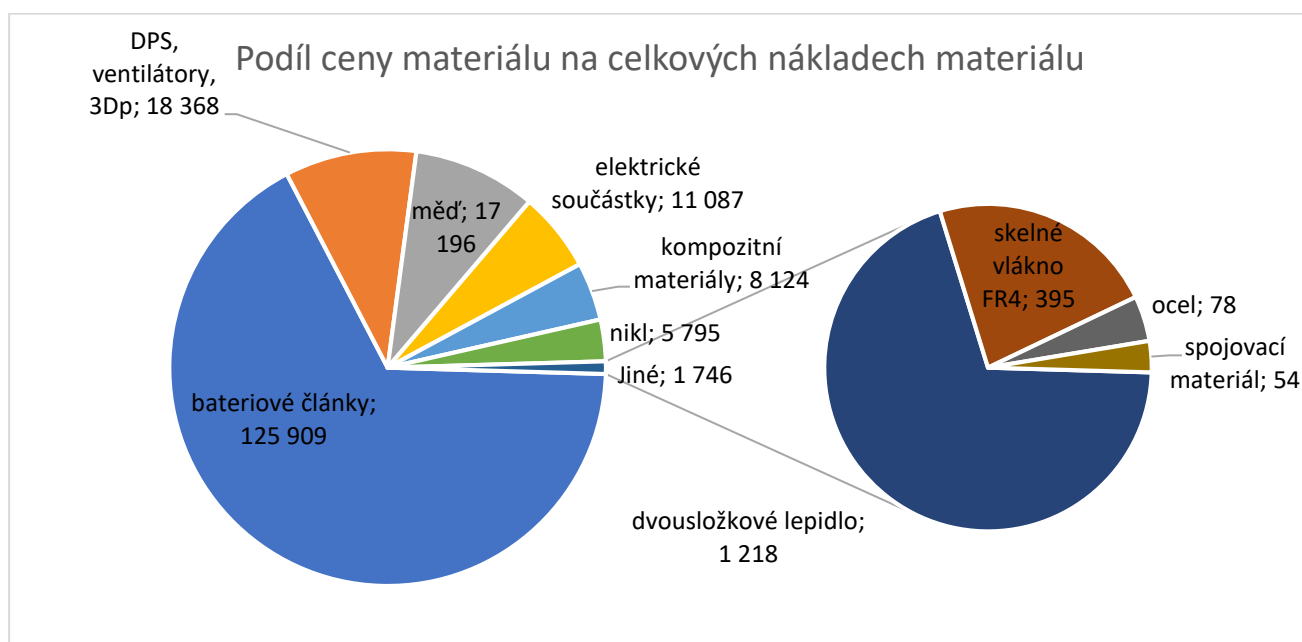
Na obrázku č. 9 je také vidět, že vykonávané činnosti jako laminace, sestavování, lepení, vrtání nebo příprava povrchu se na celkové ceně podílí jen velmi málo. Zajímavou částí je pájení součástek na desky plošných spojů, jehož náklady jsou tvořeny převážně předpokládanou mzdou pracovníků. Ta ovšem reálně vyplácena není, a tak je nutno na cenu pájení nahlížet spíše jako na hodnotu, která vyjadřuje velkou časovou náročnost tohoto procesu.

4.10.3. Detailní pohled na náklady materiálů

Náklady materiálů byly rozděleny na jednotlivé položky stejně, jako tomu bylo u procesů. Ceny těchto položek jsou v tabulce č. 13. Z ní je na první pohled patrné, že největší část nákladů je tvořena bateriovými články VTC5a. Materiálové položky ventilátorů akumulátoru, ceny výroby desek plošných spojů a ceny materiálu pro 3D tisk byly v tomto hodnocení sloučeny. Největší část této položky tvoří náklady výroby DPS, konkrétně je to 20 022 Kč. Tyto náklady lze významně snížit například zadáním výroby desek asijským dodavatelům, ovšem to s sebou nese zvýšená rizika, spojená s kvalitou výroby a spolehlivostí dopravy.

Tabulka č. 13: Ceny jednotlivých druhů materiálů

Materiál	
položka	cena [Kč]
Bateriové články	125 909
DPS, ventilátory, 3Dp	18 368
Měď	17 196
Elektrické součástky	11 087
Kompozitní materiály	8 124
Nikl	5 795
Dvousložkové lepidlo	1 218
Skelné vlákno FR4	395
Ocel	78
Spojovací materiál	54
Celkem	188 224



Obrázek č. 10: Graf podílu cen materiálu na celkové ceně materiálů

Grafické znázornění nákladů na obrázku č. 10 ukazuje, že bateriové články spolu s DPS, ventilátory a 3D tiskem tvoří přes tři čtvrtiny celkové ceny materiálů. Pokud by byla nalezena možnost nákupu těchto součástí – především bateriových článků – levněji, byl by dopad na celkovou cenu materiálů

i celého akumulátoru relativně velký. V případě baterií by bylo možné uvažovat i o alternativních modelech či přímo typech baterií, ovšem pouze za předpokladu, že by tyto alternativy splňovaly požadované parametry, tedy kapacitu, energetickou hustotu, napětí článku a vybíjecí proud. V grafu je také patrné, že cena mědi, niklu a oceli tvoří pouze malou část celkových nákladů. To je zajímavé zejména v porovnání s cenou jejich zpracování, tedy řezání a svařování, která tvoří většinu ceny procesů.

4.11. Citlivostní analýza

Citlivostní analýza je obecně nástroj, pomocí kterého je možné sledovat vliv jednoho nebo několika vstupů zkoumaného procesu na jeho výstup ^{[18], [19]}. V tomto případě bude použita její jednoduchá varianta, která zkoumá změnu na výstupu procesu, tedy výroby akumulátoru, při změně jednoho parametru na vstupu. Tento parametr bude nabývat třech hodnot.

4.11.1. Zkoumané vstupní a výstupní parametry

Výstupním parametrem sledovaného procesu je především jeho cena. Tu lze rozdělit na tři hlavní složky: cenu procesů, cenu materiálu a cenu režie, jak je vidět v tabulce č. 11. V tomto smyslu je možno rozdělit i vstupní parametry na režie, materiály a práci. Jako nejlepší volba pro zkoumaný vstup se jeví cena práce. Ta je reprezentována mzdovým ohodnocením pracovníků podle náplně jejich činnosti, přehled těchto mezd se nachází v tabulce č. 10. Vzhledem k charakteru a náročnosti výroby byla jako výše mzdy oboru vybrána hodnota třetího kvartilu souboru. Další dvě zkoumané hodnoty tohoto vstupu jsou medián mzdy, což je hodnota uprostřed vzestupně uspořádané řady hodnot sledovaného znaku ^[16] a devátý decil, který je roven hodnotě, nad kterou leží 10 % nejvyšších hodnot sledovaného znaku ^[16]. V praxi by tato změna mohla značit změnu podmínek na trhu práce či najímání pracovníků s nižší, respektive vyšší kvalifikací a zkušenostmi.

Se změnou ceny práce na vstupu nastane změna celkových nákladů na výrobu. Ze tří složek těchto nákladů se ovšem změní pouze náklady procesů, jelikož náklady materiálu a režie v sobě složku práce neobsahují a není třeba je v rámci této analýzy blíže zkoumat.

4.11.2. Výstup citlivostní analýzy

Tabulka č. 14: Změna nákladů procesů při uvažování mediánu platů

položka	Původní Q3	Medián		
	náklady [Kč]	náklady [Kč]	rozdíl absolutní [Kč]	rozdíl %
Řezání laserem	57 835	57 835	0	0,0
Svařování	34 500	32 883	-1 617	-4,7
Pájení	12 775	10 178	-2 597	-20,3
Řezání vodním paprskem	7 822	7 822	0	0,0
Laminace	9 270	7 885	-1 385	-14,9
Sestavení	2 729	2 278	-451	-16,5
Řezání manuální	1 127	947	-180	-16,0
3D tisk	1 000	1000	0	0,0
Příprava povrchu	583	533	-50	-8,6
Aplikátor tekutého lepidla	248	209	-39	-15,6
Vrtání	93	78	-15	-15,9
Instalace spojovacího materiálu	36	30	-6	-16,7
Celkem	128 019	121 679	-6 339	

Tabulka č. 15: Náklady procesů při uvažování devátého decilu platů

položka	Původní Q3	D9		
	náklady [Kč]	náklady [Kč]	rozdíl absolutní [Kč]	rozdíl %
Řezání laserem	57 835	57 835	0	0,0
Svařování	34 500	36 470	1 970	5,7
Pájení	12 775	15 525	2 750	21,5
Řezání vodním paprskem	7 822	7 822	0	0,0
Laminace	9 270	10 778	1 507	16,3
Sestavení	2 729	3 220	491	18,0
Řezání manuální	1 127	1 351	224	19,9
3D tisk	1 000	1 000	0	0,0
Příprava povrchu	583	638	55	9,3
Aplikátor tekutého lepidla	248	290	42	17,0
Vrtání	93	112	18	19,8
Instalace spojovacího materiálu	36	43	7	18,2
Celkem	128 019	135 082	7 064	

V tabulkách č. 14 a č. 15 jsou uvedeny výsledky citlivostní analýzy pro mzdy na úrovni mediánů a devátého decilu v porovnání s uvažovaným třetím kvantilem. Procesy řezání laserem, vodním paprskem a 3D tisk jsou kompletně realizovány externím dodavatelem, proto na ně nemá změna výše mezd v týmu žádný vliv. Je vidět, že nejvyšší absolutní i procentní rozdíl nastal v procesu pájení, což je způsobeno relativně vyšším mzdovým ohodnocením této činnosti. Dále je zajímavá malá relativní změna ceny svařování, tedy položky, která má na celkové ceně procesů druhý nejvyšší podíl. Ta je způsobena nízkým podílem mzdy na celkové ceně procesu, jehož většinu tvoří cena argonu.

4.11.3. Zhodnocení výsledků citlivostní analýzy

V tabulkách č. 14 a 15 vidíme, že nejvyšší absolutní rozdíly nákladů procesů se vyskytují u pájení, svařování a laminování. Při uvažování mediánu platů jsou položky s největším procentním rozdílem pájení, instalace spojovacího materiálu a sestavení, pro devátý decil to jsou pájení, manuální řezání a vrtání. Obecně jsou relativní rozdíly procesů lepení, vrtání a instalace spojovacího materiálu vysoké, ale absolutně se jedná o desítky korun. Položkami, které by byly změnou výše mezd ovlivněny nejvíce, jsou v celkovém souhrnu pájení, laminace a svařování. Peníze takto vypočtených mezd reálně vypláceny nejsou, ale z pohledu pracovníků se může jednat o opportunity cost jejich práce.

4.12. Závěr ekonomického hodnocení a možnosti optimalizace

V této kapitole byla provedena kalkulace nákladů na výrobu jednoho akumulátoru FSE.08. Tyto náklady byly rozděleny na režijní, materiálové a procesní. Materiálová a procesní složka nákladů je složkou variabilní, zatímco režijní náklady jsou převážně fixní. Z kalkulace vyplynuly jako nejnákladnější materiál bateriové články, nejnákladnějším procesem bylo řezání plechů laserem, které je prováděno externě, po něm následuje svařování, které probíhalo na dílně.

4.12.1. Návrh opatření pro snížení nákladů na materiál a jeho zpracování

Snížení nákladů na materiál je možné docílit několika způsoby. Prvním je úspora ve fázi návrhu akumulátoru, kdy je do počátečních úvah zaveden požadavek na nízkou cenu výsledného produktu. Tento požadavek ale nemůže být u výroby prototypu pro soutěž, kde je požadován hlavně výkon, nikdy prioritou. Pro zlevnění celé výroby je možné se zaměřit na nižší využití například mědi, používané na plechy k bateriovým článkům, nebo na úspornější návrh desek plošných spojů. Toho lze docílit nepřímo, pomocí vzdělávání návrhářů jednotlivých částí vozu. Další možností, která může přinést okamžité snížení reálných nákladů, je strategické uzavírání sponzorských smluv s dodavateli nejnákladnějších materiálů. Největší dopad by mělo uzavření sponzorské smlouvy s dodavatelem bateriových článků, které tvoří většinu materiálových nákladů. Úspory v řádech desetitisíců by bylo možné docílit i jednáním s dodavateli kovů, tedy mědi, niklu a oceli. U procesních nákladů by bylo přínosné uvažovat o oslovení dodavatele, který je schopen pálení kovů laserem, jelikož se jedná o nejvyšší z procesních nákladů, a zároveň je celé zhotovováno externě.

4.12.2. Možnosti snížení nákladů na bateriové články a predikce vývoje

Bateriové články tvoří dle provedené analýzy zhruba dvě třetiny nákladů na materiál pro výrobu akumulátoru. Snížením jejich ceny by tedy došlo k výraznému ovlivnění ceny celkové. Kromě obecných doporučení pro snížení této ceny, tedy využít nejlevnější nabídky pro nákup, optimalizovat návrh či přehodnotit požadované parametry tak, aby bylo možné použít menší množství článků, je nutné uvažovat i konstantní vývoj technologie bateriových článků. Zde existují dvě cesty, které je možné využít. První je zachování použití technologie Li-ion článků, jejíž cena se bude podle dostupných predikcí se zvyšující se energetickou hustotou dále snižovat ^{[20], [21], [22]}. Druhou možností je použití nových bateriových technologií, které mohou být s postupujícím výzkumem vhodné k využití v monopostu. Konkrétními příklady těchto technologií jsou lithium-sírové baterie a Li-air baterie. Kombinace lithium-síra teoreticky nabízí vysokou kapacitu, energetickou hustotu a nízkou cenu, ale stále je zatížena i množstvím nevýhod. Konkrétně jsou to nízký počet možných nabití a vybití článků, samovybíjení a úbytek kapacity ^{[5], [23]}. Tento systém je nicméně velmi slibný pro zvýšení energetické hustoty článků a snížení ceny, jelikož síra je relativně dostupný prvek ^[24]. Další technologií a dalším teoretickým vývojovým stupněm po Li-S článcích jsou tzv. Li-air články, kde elektrický proud vzniká oxidací lithia na anodě a redukcí vzduchu na katodě ^[24]. Tato technologie by mohla přinést

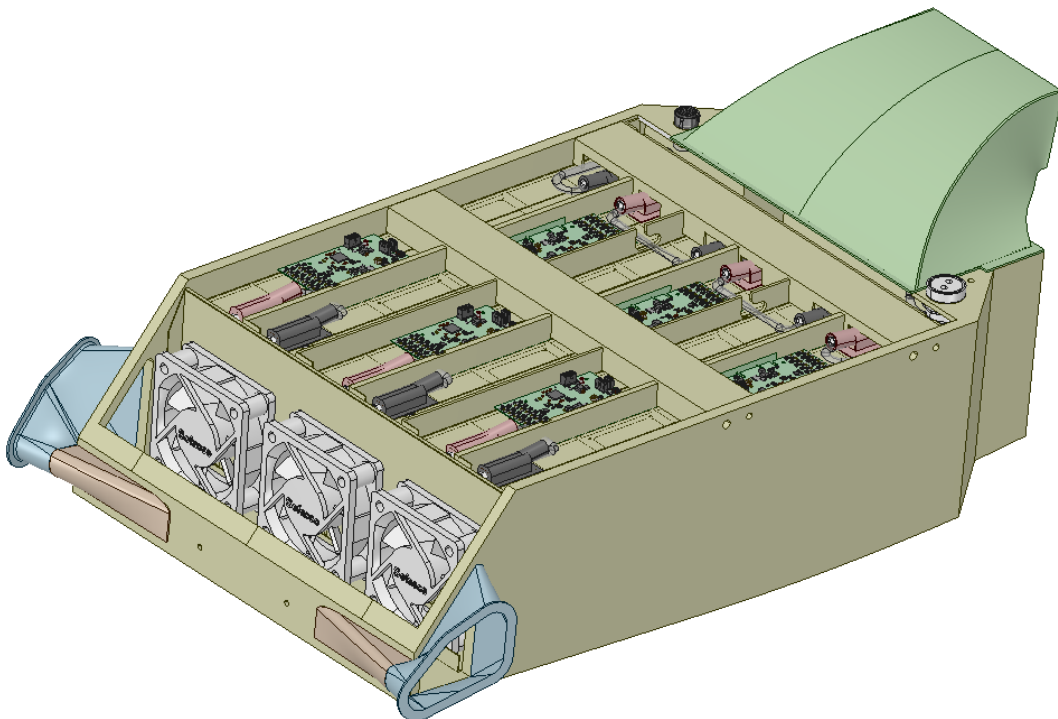
několikanásobně vyšší energetickou hustotu než Li-ion nebo Li-S články, ale je nutno překonat ještě mnoho neduhů, mezi které patří například nízká životnost, potíže s oddělením lithia od elektrolytu, což postupem času způsobí náhlé skokové snížení kapacity, nebo nároky na čistotu vzduchu, který baterie „dýchá“^{[23], [24]}. Obecně lze říci, že s rostoucím zájmem o úložiště energie, spojeným například s rozvojem elektromobility, bude růst objem investic do výzkumu technologií bateriových článků a je tedy možné očekávat zlepšování jmenovitých parametrů dosavadně používaných technologií, případně rozvoj technologií nových.

5. Simulace akumulátoru FSE.08

V této kapitole bude provedena simulace proudění chladícího vzduchu akumulátorem osmé generace. To umožní sledovat vliv konstrukce na průtok vzduchu, a tedy i efektivitu chlazení, jak již bylo řečeno ve třetí kapitole.

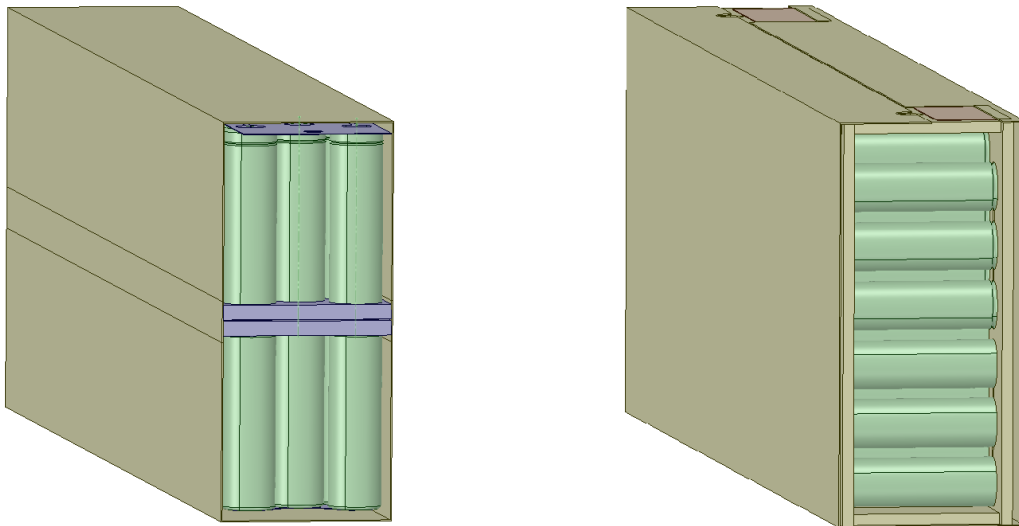
5.1. Konstrukční změny oproti minulé sezoně

Akumulátor osmé generace přináší oproti svému předchůdci několik konstrukčních změn. Vizuálně nejvýraznější změnou jsou nástavce pro přívod a odvod chladícího vzduchu, dva přívodní po stranách akumulátoru a jeden pro odvod vzduchu v zadní části. Další změnou, viditelnou na obrázku č. 9 je umístění ventilátorů. U akumulátoru osmé generace jsou ventilátory v přední části kontejneru, zatímco u předchozího modelu byly připevněny k zadní stěně kontejneru. Rozdílné je i uložení bateriových článků. Ty jsou, stejně jako v minulém modelu, rozloženy v šesti oddílech, ale uložení článků je nově horizontální, nikoliv vertikální. Výsledné rozměry akumulátoru se tím zvětšily, z původních 74 cm délky a 39 cm šířky na 76 cm délky a 46 cm šířky. Výška se bez uvažování výfukového nástavce prakticky nezměnila a je rovna asi 20 cm.



Obrázek č. 11: Vizualizace akumulátoru FSE.08

Na obrázku č. 12 níže je možno vidět porovnání dvou oddílů bateriových článků, tedy stacků, akumulátorů sedmé a osmé generace. Zatímco v minulé sezoně byly články uspořádány ve dvou řadách nad sebou, nyní je zvolena metoda příčného, respektive horizontálního uložení. To s sebou nese nároky na pevnost konstrukce stacku tak, aby byly všechny články bezpečně uchyceny. Významnou změnou je i vzdálenost mezi články, ta vzrostla o dva milimetry na 3,8 mm.



Obrázek č. 12: Porovnání stacků dvou generací akumulátoru, nalevo FSE.07, napravo FSE.08

5.2. Úpravy modelu akumulátoru před započítáním simulace

Před započítáním procesu simulace proudění je nutné zkoumaný model upravit tak, aby byly odstraněny části modelu se složitou geometrií, které se na výsledku výpočtu podílejí pouze minimálně. Jmenovitě se jedná o všemožný spojovací materiál, konektory nebo desky plošných spojů se součástkami. Tato úprava je důležitá pro fázi dělení modelu na elementární síť, kdy by byl výpočetní software neúměrně zatěžován a výsledná síť by mohla být velmi nekvalitní, i pro fázi samotného výpočtu, kdy by i v případě sítě dostatečné kvality mohly výpočetní časy stoupat nad únosnou mez. Dále byly odstraněny konektory a kabely včetně krycí stěny kabelů, pojistka a proudový senzor, stěny uložení těchto součástek a modely ventilátorů. Stejně tak byly odstraněny nástavce pro přívod a odvod vzduchu, jelikož jejich složitý tvar by mohl způsobit výpočetní problémy. Navíc byly odebrány i svařované plechy z niklu a mědi a tvarované držáky bateriových článků, jejichž komplikovanější struktura ovlivňuje kvalitu vytvořené sítě.

Geometrie bateriových článků byla taktéž zjednodušena. Z detailního modelu s několika zaoblenými a malými hranami byl vytvořen prostý válec, čímž se tvar článku změnil nepatrně, ale vliv na model i vzhledem k velkému počtu těchto článků je značný. Jako další byly upraveny kryty stacků, které se skládaly jak ze stěn, tak z jejich výztuh, jejichž účelem je celou konstrukci zpevnit. Výsledná geometrie tohoto modelu byla ovšem pro účely simulace složitá, a tak byla sestava dílů krytu stacku nahrazena jedním tělesem, který zachovává v co největší možné míře původní geometrické vlastnosti krytu.

Z důvodu omezené výpočetní kapacity a možnosti porovnání s výsledky simulace akumulátoru minulé generace bude předmětem tohoto výpočtu opět pouze jeden bateriový stack, tedy asi jedna šestina celého akumulátoru.

5.3. Rozdělení modelu nového akumulátoru na síť buněk

Po zkušenostech se simulací akumulátoru minulé generace byl nyní kladen velký důraz na kvalitní rozdělení modelu na síť elementárních částic, tedy mesh. Po odstranění všech těles, která by mohla v tomto procesu působit potíže, byl model importován do modulu Mesher. Zde bylo nutno vybrat metodu dělení modelu. Vzhledem k přítomnosti velkého množství zakřivených ploch a malých prostor mezi plochami bylo zvoleno dělení na čtyřstěny, konkrétně metoda Patch independent. Ta nejdříve dělí objemy tělesa a poté promítá vzniklou síť na plochy. Ta tak i přes velké množství geometricky složitých ploch, především stěn článků, bude mít přijatelnou kvalitu pro další výpočty.

Pro hodnocení kvality meshe jsou obecně důležité parametry zešikmení a ortogonální kvalita. Zešikmení buňky vyjadřuje její zkreslení oproti ideální rovnostranné buňce a nabývá hodnot od nuly do jedné, kde nula je ideální hodnota a jednička značí maximální zkreslení. Ortogonální kvalita je hodnota, vyjadřující ortogonalitu vektorů, popisujících jednotlivé buňky. Také tato veličina nabývá hodnot od nuly do jedné, ale zde je ideální hodnotou jednička, zatímco nula je nejhorší.

Tabulka č. 16: Hodnocení kvality meshe pro simulaci akumulátoru FSE.08

Hodnota	Zešikmení	Ortogonální kvalita
Minimum	0,001	0,385
Průměr	0,245	0,853
Maximum	0,667	0,993

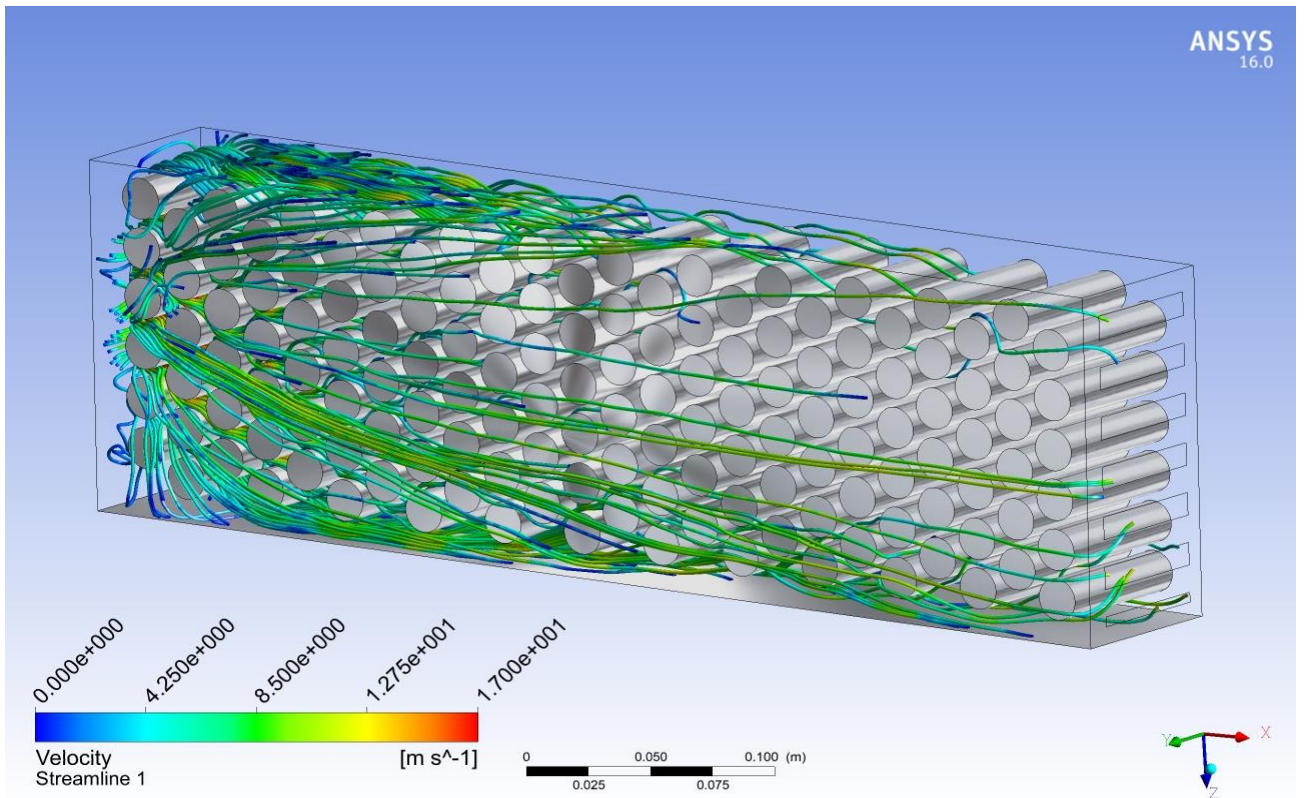
V tabulce výše jsou zapsány hodnoty, převzaté přímo z programu Mesher pro zpracovaný model stacku, který byl použit ve výpočtu. Průměrné hodnoty obou parametrů jsou velmi dobré, minimální hodnoty – nejhorší – se u ortogonální kvality dají rovněž hodnotit jako velmi dobré. Maximální hodnota zešikmení buňky je vyšší, ale stále je ji možno zařadit do oblasti dobré kvality, která by neměla způsobovat problémy při následném výpočtu ^[6].

5.4. Zvolené parametry simulace

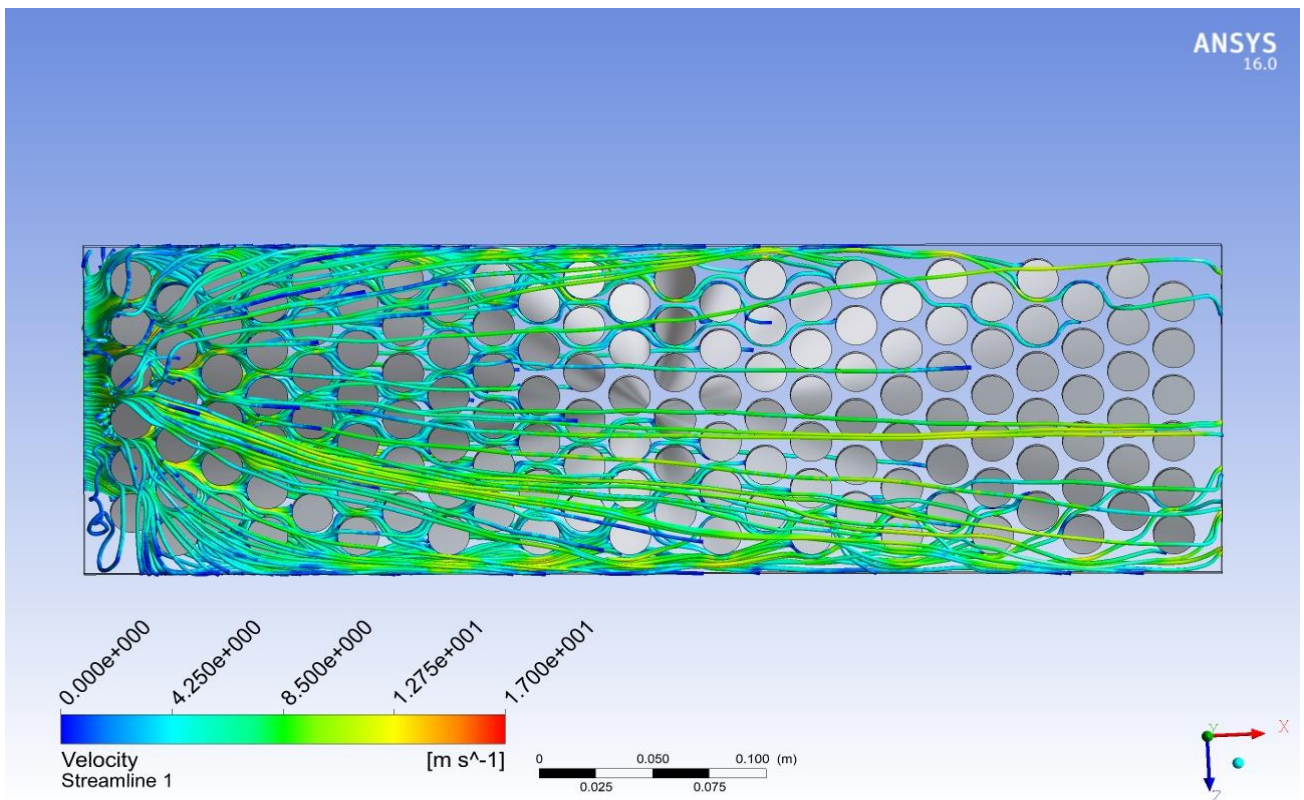
Stejně jako při předešlé simulaci akumulátoru sedmé generace byl pro výpočet zvolen realizovatelný model pro turbulentní proudění k-epsilon. Byly označeny všechny potřebné zóny vstupu a výstupu vzduchu, stejně jako stěny modelu. Rychlostí vstupujícího vzduchu byla zvolena hodnota 10 m/s, která odpovídá hodnotě použité v první simulaci. Volbou stejných segmentů geometrie akumulátoru pro simulaci a stejných parametrů bude možné vzájemně porovnat obě konstrukce stacků a zjistit, které řešení umožňuje lepší průchodnost pro chladící vzduch.

5.6. Výstup provedené simulace

Výstup simulace proudění chladícího vzduchu částí akumulátoru FSE.08 je zobrazen ve formě proudnic vzduchu graficky na obrázcích č. 13 a 14. Zde je na první pohled vidět, že vzduch zde je vytlačován do prostoru nad a pod články, ale jeho část proudí i mezi nimi, a to po většinu délky stacku. Z obrázků č. 13 a 14 je vidět, že část chladícího média zde proudí i po stranách článků, tedy v prostoru mezi koncem článku a stěnou stacku. To ovšem neodpovídá reálné konstrukci, kde jsou články uchyceny ve tvarované stěně, která byla v rámci zjednodušení modelu odstraněna. Tento vzduch by nejspíše proudil v prostoru mezi články a jeho podstatná část by byla vytlačena do prostorů nad a pod články, kam se jeho většina dostane i v této simulaci.



Obrázek č. 13: Výstup simulace proudění vzduchu stackem akumulátoru FSE.08 se zobrazenými stěnami článků



Obrázek č. 14: Výstup simulace proudění vzduchu stackem akumulátoru FSE.08 se zobrazenými stěnami článků, boční pohled

5.7. Vyhodnocení informací z provedené simulace

Před samotnou simulací byl importovaný model akumulátoru osmé generace upraven tak, aby bylo možné požadovaný výpočet reálně provést. Konkrétně to znamená redukci modelu na jeden stack bateriových článků, ze kterého byly odstraněny součásti se složitou geometrií. Takto upravený model byl rozdělen na síť elementárních buněk. Kvalita této sítě byla velmi dobrá, což ale způsobilo vyšší výpočetní časy. Výstup provedeného výpočtu byl zobrazen graficky. Ze simulace vyplynulo, že většina chladícího vzduchu je postupně vytlačena k vrchní a spodní stěně stacku, nicméně zejména na spodní straně proudí menší část vzduchu až k výstupním otvorům a první polovina článků je chlazena nadpoloviční částí celkového množství vháněného vzduchu, což je oproti situaci v akumulátoru minulé generace výrazné zlepšení. To je způsobeno nejspíše změnou konstrukce stacků, kde nejvýznamnějšími změnami bylo vodorovné uložení článků a zvětšení mezer mezi nimi o dva milimetry. Provedená simulace tedy proběhla úspěšně a potvrdila lepší prostupnost chladícího vzduchu stackem nové koncepce. Pro úplnost informací o tepelných poměrech akumulátoru by bylo ideální vypracování časově proměnné simulace, zahrnující i generování tepla články a jeho odvod. Taková simulace je však neproveditelná vzhledem k výpočetním prostředkům, dostupným autorovi. Konkrétní data, která by potvrdila nebo vyvrátila správnost zjištěných skutečností, byla v době dokončení této práce nedostupná, neboť nový akumulátor ještě nebyl sestaven.

6. Stanovení finanční úspory v projektu FSE

Finanční úspora může být stanovena buď jako porovnání nákladů na výrobu akumulátoru sedmé a předchozí šesté generace nebo jako vyčíslení dopadu konkrétních úsporných opatření na celkové náklady akumulátoru.

6.1. Porovnání nákladů pro výrobu akumulátoru FSE.06 a FSE.07

Při porovnání nákladů na výrobu akumulátoru sedmé generace s jiným modelem je v první řadě nutné tento jiný model k porovnání vybrat. Vzhledem k rychlému vývoji akumulátorů a jejich měnící se konstrukci jsou nejvíce rozumnými kandidáty akumulátory předešlé a následující generace. Aby byly vzniklé poznatky relevantnější, byl by lepší volbou nový akumulátor. Jeho cena však nebyla do termínu dokončení této práce vyčíslena. Proto je pro porovnání zvolen akumulátor šesté generace. Jeho konstrukce se však od sedmé generace výrazněji liší, například je místo článků Sony VTC5a použit model VTC5 a celkový počet bateriových článků je nižší, místo 864 jich bylo použito pouze 768^[27].

Náklady na výrobu akumulátoru FSE.06, určené v rámci dokumentu Cost Report, jsou rovny zhruba 167 000 Kč. To zahrnuje bateriové články, výrobu kontejneru pro akumulátor, náklady na nákup elektrických komponent a výrobu desek BMS, spojovací materiál a sestavení celého akumulátoru. Naopak režijní náklady a náklady některých procesů, jako svařování, osazování a oživování BMS nebo řezání laserem či vodním paprskem zahrnuté nejsou. Odhad nákladů je v Cost reportu vypracován pro celý monopost a v rámci soutěže FSG není nutné počítat náklady tak podrobně, jako v této práci. Takové určení nákladů pro celý vůz by vzhledem k jeho časové náročnosti ostatně ani nebylo možné.

I přes výše zmiňované rozdíly odhadu nákladů obou akumulátorů je mezi sebou lze porovnat. V odhadu ceny nového akumulátoru je však potřeba uvažovat pouze náklady na procesy a materiál, které jsou zahrnuté v odhadu starším. Takto budou náklady na výrobu sedmé generace rovny zhruba 161 000 Kč. Čistě rozdílem obou odhadů lze tedy dojít k závěru, že úspora nákladů na výrobu akumulátoru sedmé generace oproti předchozí generaci je zhruba šest tisíc korun. Je ale třeba mít na paměti, že šestá generace obsahuje o devadesát šest bateriových článků méně, tudíž je skutečná úspora ještě vyšší.

6.2. Vliv konkrétních úsporných opatření na celkové náklady

Navrhovaná opatření ke snížení finanční náročnosti konstrukce akumulátoru se pro materiál soustředila hlavně na snižování nákladů již ve fázi návrhu. Pokud je již proces výroby úplně nebo téměř dokončen, hledání úspory v něm nemá smysl i proto, že akumulátor je klíčovou součástí vozu, jejíž poškození nebo zničení by po takovémto optimalizačním zásahu mohlo znamenat velmi předčasný konec sezony. Zároveň je v takové části sezony brzy na koncipování nové generace akumulátoru, a tak ani není možné činit příliš konkrétní návrhy na snížení nákladů na základě analýz současné verze. Pro dosažení úspor je nutné je v začátku fáze návrhu stanovit jako jednu z priorit a všem, kdo se na návrhu podílejí, tuto skutečnost průběžně připomínat. Pro snížení nákladů procesů je možné například optimalizovat tvar kovových součástí, které budou řezány laserem, tak, aby došlo ke snížení počtu či délky potřebných řezů. V případě niklových a měděných plechů by úsporu přineslo jednak snížení náročnosti svařování, protože na jeden takový plech ve zkoumaném akumulátoru je potřeba zhotovit desítky bodových svarů. To kromě vysoké časové náročnosti způsobuje i vyšší spotřebu argonu, který se na celkových nákladech významně podílí. I když největší podíl nákladů na materiál mají bateriové články, je zde kromě možnosti jednání o sponzorství relativně malý prostor pro úspory. Hlavní změnou v této oblasti tak s rozvojem Li-ion technologie a jejích alternativ bude nejspíše zavádění bateriových článků s lepšími jmenovitými parametry jako je energetická hustota. Tak bude

možné pro dosažení srovnatelného výkonu, jehož maximální výše je omezena pravidly^[4], použít menší množství článků, což se promítne do celkových nákladů na materiál.

6.3. Zhodnocení provedené simulace z hlediska možností úspory

Cílem simulace proudění vzduchu akumulátorem bylo nejen získání poznatků o vlivu konstrukce akumulátoru na jeho chlazení, ale i hledání možností, jak získané informace využít ke snížení finanční náročnosti konstrukce. Jak bylo již v této práci řečeno, prioritou při konstrukci vozu jsou jeho jízdní vlastnosti a výkon. Jejich zlepšení lze dosáhnout například právě zefektivněním chlazení baterií. To teoreticky zajistí týmu lepší umístění v jednotlivých závodech. Tyto výsledky pak bude možné použít při vyjednávání s potenciálními sponzory, čímž lze v případě úspěšného jednání dosáhnout úspor. Konkrétní částku, kterou zefektivnění chlazení v akumulátoru osmé generace přinese, ale není možné v době dokončení této práce určit.

6.4. Celkové zhodnocení stanovení úspor

Porovnání nákladů na výrobu různých akumulátorů je složité nejen z důvodu jejich odlišné konstrukce, ale také kvůli odlišnému způsobu určení dostupných odhadů. Při porovnání je nutné vzít v úvahu nejen čistý peněžní rozdíl, ale i zvýšení užitné hodnoty akumulátoru, ke které mezi porovnávanými modely došlo, tedy zvýšení kapacity a snížení ztrátového výkonu. Po úpravě odhadů nákladů na obě generace akumulátorů, která umožnila jejich porovnání, bylo zjištěno, že oproti modelu FSE.06 bylo dosaženo úspory zhruba 6 000 Kč. Zároveň akumulátor sedmé generace obsahuje o 96 bateriových článků více, což by v případě shodné ceny baterií znamenalo dalších asi 14 000 Kč, o které byla hodnota nového akumulátoru navýšena. Vyčíslit výši úspor, které je možné získat implementací navržených opatření, je obtížné. Většina opatření je obecných a zabývá se spíše konceptem, ale vzhledem k charakteru výroby – každý rok nový prototyp – můžou být navrhované konceptuální změny relativně rychle diskutovány a zavedeny. Podobně je to i s inovací v oblasti chlazení akumulátoru. Vliv zlepšení, které bylo potvrzeno vypracovanou simulací, bude nutné testovat v průběhu soutěžní sezony a nyní nelze jednoduše vyčíslit úsporu, kterou přinese.

7. Závěr

Cílem této práce bylo provedení analýzy finanční náročnosti výroby akumulátoru studentské formule sedmé generace, provedení analýzy tepelného zatížení akumulátorů sedmé a osmé generace, jejich porovnání a nalezení možností finanční úspory v projektu.

Analýzou stávajícího řešení akumulátoru sedmé generace bylo zjištěno, že maximální teplota bateriových článků je omezena pravidly na maximální teplotu 60 °C, v jiném používání pak stejnou hranici stanovují pokyny výrobce. Tato teplota by při využití maximálního výkonu akumulátoru při závodu byla překročena, proto je nutné výkon omezovat, což bylo doloženo měřením teplot při takovém provozu. Zároveň z tohoto měření vyplynulo, že voda je výrazně účinnějším chladivem, ale jejímu využití brání složitost takového řešení.

V procesu simulování tepelného zatížení byly redefinovány požadavky na simulaci tak, aby ji bylo možné reálně vypracovat a zároveň bylo na výstupu zachováno co největší množství informací. Do výpočetního modulu programu Ansys tak byl importován zjednodušený model části akumulátoru a byla provedena simulace proudění chladícího vzduchu v něm. Ta potvrdila, že chlazení sedmé generace akumulátoru je nedostatečné a vzduch proudí pouze kolem asi dvou třetin z celkového počtu článků, přičemž jeho efektivita prudce klesá už u jedné pětiny simulovaných článků. Tento výsledek odpovídá i uvedeným měřením teploty akumulátoru.

Byla provedena analýza výrobního procesu a vyčísleny náklady, které při něm vznikají. Jejich celková výše je zhruba 650 tisíc korun, z toho režie tvoří asi 333 tisíc korun, náklady procesů 128 tisíc korun a materiálové náklady 188 tisíc korun. Tyto náklady byly dále rozděleny na jednotlivé položky a jejich podíl byl graficky znázorněn. Pro procesní a materiálové náklady byly identifikovány položky, které se na jejich celkové výši nejvíc podílejí, nejnákladnější položkou jsou bateriové články v hodnotě 126 tisíc korun, dále je to proces řezání laserem, jehož náklady dosahují asi 58 tisíc korun a dále svařování s náklady zhruba 34 tisíc korun. Metodami snížení finanční náročnosti těchto položek jsou pro bateriové články uzavření sponzorské smlouvy s jejich dodavatelem a aktivní průzkum trhu za účelem nalezení alternativ, využívajících zdokonalené technologie Li-ion nebo technologií nových. Pro řezání laserem, realizovaným externím dodavatelem, připadá úvahu opět oslovení dodavatele za účelem sponzoringu nebo optimalizace návrhu řezaných dílů tak, aby byl počet řezů a čas řezání redukován. Finanční náročnost svařování lze zajistit hlavně optimalizací návrhu akumulátoru tak, aby neobsahoval neúměrně velké množství bodových svarů, jako je tomu nyní.

Simulace proudění vzduchu akumulátorem osmé generace probíhala podobně, jako simulace předchozí generace akumulátoru, po zjednodušení modelu byl do výpočetního modulu importován opět jeden stack baterií. Ten byl rozdělen na síť elementárních prvků, kdy se pomocí vhodně zvolené metody dělení podařilo dosáhnout velmi dobré kvality sítě. Poté byl proveden samotný výpočet simulace se stejnými parametry, jako u minulé generace. Ten proběhl úspěšně, výstup simulace byl opět zobrazen graficky. Porovnáním obou výstupů bylo zjištěno znatelné zlepšení průchodnosti stacku pro chladící vzduch, což bude nejspíše mít za následek i výrazné zlepšení tepelných vlastností nového akumulátoru. Jako nejpravděpodobnější zdroj tohoto zlepšení bylo identifikováno zvětšení mezer mezi jednotlivými bateriovými články o dva milimetry. Výstup simulace nemohl být porovnán s reálným měřením, protože v době dokončení práce nebyla výroba nového akumulátoru dokončena.

Jelikož v době dokončení práce nebyly dostupné informace o nákladech na výrobu akumulátoru osmé generace, bylo stanovení velikosti úspory v projektu provedeno porovnáním nákladů na výrobu akumulátorů šesté a sedmé generace. Odhad výše nákladů na výrobu šesté generace byl převzat

z dokumentů týmu eForce. Ten byl vypracován jinou metodikou, proto byl odhad, vzniklý v této práci zjednodušen, aby bylo možné oba údaje porovnat. Tím byla zjištěna úspora v novější sedmé generaci ve výši zhruba šest tisíc korun, která vznikla i při zvýšení užité hodnoty akumulátoru ve formě vyšší kapacity a nižšího ztrátového výkonu. Vyčíslení možných úspor, vzniklých aplikací navrhovaných opatření, je obtížné, jelikož tato opatření mají většinou podobu návrhu na úpravu určitého konceptu konstrukce, ale nezabývají se konkrétními součástkami akumulátoru. Tyto návrhy – pokud k nim bude přihlédnuto již v počátku koncepce nového akumulátoru – mohou ovlivnit větší oblast konstrukce akumulátoru a zajistit vyšší úspory než opatření, zaměřující se na jednotlivé díly.

Závěrem lze říci, že se podařilo splnit všechny body zadání této práce, přičemž bylo dosaženo několika užitečných poznatků. Předně jsou to výstupy tepelných simulací, které potvrdily předpoklady o nedostatečnosti chlazení akumulátoru sedmé generace a zároveň ukázaly výrazné zlepšení v generaci osmé. Neméně zajímavé je i vyčíslení nákladů na výrobu akumulátoru, ze kterého vyplynula vysoká náročnost procesů řezání plechů laserem a svařování, která by ale mohla být již v příští generaci při využití navrhovaných opatření reálně snížena.

Literatura

- [1] O nás. *EForce FEE Prague Formula* [online]. Praha, 2018 [cit. 2019-01-07]. Dostupné z: <https://eforce.cvut.cz/o-nas/>
- [2] About. *Formula Student Germany* [online]. [cit. 2019-01-07]. Dostupné z: <https://www.formulastudent.de/about/concept/>
- [3] FSE.07. *eForce FEE Prague Formula* [online]. Praha, 2017 [cit. 2019-01-07]. Dostupné z: <https://eforce.cvut.cz/fse-7/>
- [4] *Formula Student Rules 2019* [online]. V1.1. Formula Student Germany, 2018 [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2019/rules/FS-Rules_2019_V1.1.pdf
- [5] 39. *nekonvenční zdroje elektrické energie* [online]. Praha: Česká elektrotechnická společnost, 2018 [cit. 2018-12-17]. ISBN 978-80-02-02786-7. Dostupné z: <http://www.nzee.cz>
- [6] WILCOX, David C. *Turbulence modeling for CFD*. 2nd ed. Anaheim: DCW Industries, 1998.
- [7] BU-205: Types of Lithium-ion. *Battery university* [online]. Vancouver, 2011 [cit. 2019-01-07]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- [8] Podpořené projekty pro propagaci a podporu studia na FEL 2018. *České vysoké učení technické v Praze: Fakulta Elektrotechnická* [online]. Praha, 2018 [cit. 2019-01-07]. Dostupné z: <http://www.fel.cvut.cz/cz/aktuality/propagace-podpora-projekty>
- [9] Měření teploty – polovodičové odporové senzory teploty. *Vývoj HW* [online]. 2004 [cit. 2019-01-07]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>
- [10] *Cooling fan & blower fo telecommunication datasheet* [online]. 2013 [cit. 2019-01-07]. Dostupné z: [https://cz.mouser.com/datasheet/2/659/Sunon%20Application Telecommunication \(196-W\)-1314444.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/659/Sunon%20Application%20Telecommunication%20(196-W)-1314444.pdf)
- [11] *US18650 VTC5a datasheet* [online]. Sony Energy Devices Corporation [cit. 2019-01-07]. Dostupné z: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0697/3395/files/US18650VTC5A_spec.pdf?3978652597953921962
- [12] Thermal conductivity of common materials and gases. *Engineering ToolBox* [online]. 2003 [cit. 2019-01-07]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html
- [13] Předpis 274/2001 Sb. *Poslanecká sněmovna parlamentu České republiky* [online]. Praha: Parlament České republiky, 2001 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <http://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=274&r=2001>
- [14] Spotřeba vody. *Pražské vodovody a kanalizace* [online]. Praha: PVK, 2019 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <https://www.pvk.cz/vse-o-vode/pitna-voda/spotreba-vody/>

- [15] Ceník elektřiny pro podnikatele. *Pražská energetika, a.s.* [online]. Praha: Pražská energetika, 2019, 2019 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <https://www.pre.cz/Files/firmy/elektrina/archiv-produktu/2019/ceniky-05/aktiv-predi/>
- [16] Informační systém o průměrných výdělcích. *Ministerstvo práce a sociálních věcí* [online]. Praha: MPSV, 2019 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <https://www.mpsv.cz/ISPV.php?>
- [17] Předpis 586/1992 Sb. *Poslanecká sněmovna parlamentu České republiky* [online]. Praha: Parlament České republiky, 1992 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <https://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=586&r=1992>
- [18] SALTELLI, A. *Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models*. Hoboken, NJ: Wiley, c2004. ISBN 04-708-7093-1.
- [19] Overview of Sensitivity analysis. *Corporate Finance Institute* [online]. CFI Education [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/modeling/what-is-sensitivity-analysis/>
- [20] *Electric Vehicles in New Zealand: Technologically Challenged?* [online]. Christchurch, 2013 [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/319162842_Electric_Vehicles_in_New_Zealand_Technologically_Challenged
- [21] Future of batteries. *Arthur D. Little* [online]. Luxembourg: Arthur D. Little Global, 2019, May 2018 [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: https://www.adlittle.com/sites/default/files/viewpoints/adl_future_of_batteries-min.pdf
- [22] BLOMGREN, George E. The Development and Future of Lithium Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society* [online]. 2017, **164**(1), A5019-A5025 [cit. 2019-05-05]. DOI: 10.1149/2.0251701jes. ISSN 0013-4651. Dostupné z: <http://jes.ecsdl.org/lookup/doi/10.1149/2.0251701jes>
- [23] BADWAL, Sukhvinder P. S., Sarbjit S. GIDDEY, Christopher MUNNINGS, Anand I. BHATT a Anthony F. HOLLENKAMP. Emerging electrochemical energy conversion and storage technologies. *Frontiers in Chemistry* [online]. 2014, **2** [cit. 2019-05-05]. DOI: 10.3389/fchem.2014.00079. ISSN 2296-2646. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4174133/>
- [24] Experimental rechargeable batteries. *Battery University* [online]. Vancouver, 2018 [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/experimental_rechargeable_batteries
- [25] Ceník plynu pro malooběratele. *Pražská energetika, a.s.* [online]. Praha: Pražská energetika, 2019, 2019 [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://www.pre.cz/Files/plyn/archiv-produktu/2018/pre-plyn-standart-ppd/>
- [26] Vizualizace akumulátoru elektrické formule. In: *Interní úložiště eForce* [online]. Praha, 2016 [cit. 2019-01-07].
- [27] Engineering design report. In: *Interní úložiště eForce* [online]. Praha, 2016 [cit. 2019-01-07].
- [28] *Faktury za dodaný materiál*. Dokumenty týmu eForce, [2018] [cit. 2018-12-10].

Seznam zkratek

ACP	Acumulator Pack
AIR	Acumulator Isolation Relay
AMS	Acummulator management system
BMS	Battery management systém
CTU	Czech Technical University
DPS	Deska plošných spojů
FEE	Faculty of Electrical Engineering
FSE	Formula Student East
FSG	Formula Student Germany
LVS	Low Voltage Systém

Přílohy

Příloha č. 1: Výpočty a grafy