



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrických pohonů a trakce**

Akumulátorová baterie pro elektrickou formuli

Battery pack for electric formula

Bakalářská práce

Studijní program:	Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor:	Aplikovaná elektrotechnika
Vedoucí práce:	Ing. Vít Hlinovský, CSc.

Adam Podhrázký

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Adam Podhrázký

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: Akumulátorová baterie pro elektrickou formuli

Pokyny pro vypracování:

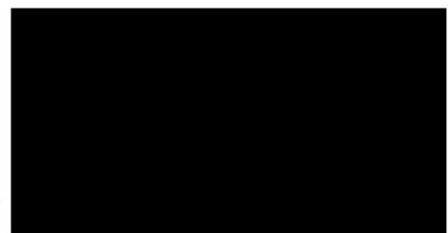
- 1) Porovnání sekundárních článků použitelných pro pohon elektrických vozidel
- 2) Elektro-mechanický návrh uspořádání akumulátorové baterie
- 3) Testování parametru navržené a vyrobené baterie
- 4) Test na reálném vozidle

Seznam odborné literatury:

- [1] Cenek M., et al.: Akumulátory od principu k praxi. Praha : FCC PUBLIC s. r. o., 2003.
- [2] Andreáš M., Ručka M.: Nabíječky a nabíjení. Třetí vydání. Praha : BEN, 2002.
- [3] Krejčířík A.: Napájecí zdroje 1. První vydání. Praha : BEN, 2002.
- [4] <http://www.orbtronic.com/sony-18650-2600mah-vtc5-30a-high-drain-hybrid-imr-li-ion-battery>
- [5] <https://www.ecig-vapo.com/sony-vtc5-30a-2600mah-battery-p-1354.html>

Vedoucí: Ing. Vít Hlinovský, CSc.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016



V Praze dne 1. 10. 2014

Vzor citačního záznamu

PODHRÁZSKÝ, A. *Akumulátorová baterie pro elektrickou formuli*. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrických pohonů a trakce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně. Dále prohlašuji, že jsem všechny použité zdroje správně a úplně citoval a uvádím je v příloženém seznamu použité literatury.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této závěrečné práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) v platném znění.

V Praze dne

podpis:

Poděkování

Na tomto místě bych rád vyjádřil poděkování svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Vítu Hlinovskému, CSc. za poskytnutí zázemí při vývoji a testování baterie, za jeho odborné rady a připomínky.

Dále bych chtěl poděkovat všem členům týmu eForce FEE Prague Formula za spolupráci při vývoji a také rodině a přátelům za jejich trpělivost a podporu.

Anotace (Abstrakt)

Bakalářská práce na téma „Akumulátorová baterie pro elektrickou formuli“ je rozdělena do čtyř kapitol. První kapitola se zabývá lithiovými články, které jsou současně dostupné a vhodné pro pohon elektrických vozidel a jejím cílem je najít a vybrat článek, který nejlépe naplní nároky této konkrétní aplikace. Druhá část je zaměřena na vypracování konkrétního elektro-mechanického návrhu stacků baterie a jejího vnitřního uspořádání. Úkolem je také návrh zrealizovat a baterii zkonstruovat. Třetí část této práce je zaměřena na testování baterie po jejím sestavení a kontrola všech důležitých parametrů. Poslední kapitola je zaměřena na vyhodnocení dat z průběhu sezóny a navržení možných zlepšení pro novou generaci této baterie.

Klíčová slova

Baterie, trakční baterie, akumulátor, Formula Student, sekundární články, formule, elektro-mechanický návrh.

Annotation (Abstract)

Bachelor thesis on theme „Rechargeable battery for electric formula“ is divided into four chapters. The first chapter is focused on lithium based cells that are currently available and finds solution to demands of application in electric formula drivetrain. The second part is focused on elaboration of specific electro-mechanical design of battery stacks and whole internal organisation. The goal of this chapter is also to build the battery physically. The goal of the third part of the thesis is to test the battery after an assembly and checking all important parameters. The last chapter is focused on elaborating all collected data from the entire racing season and suggesting possible improvements for the next generation of the battery.

Key words

Battery, traction battery, accumulator, Formula Student, secondary cells, formula, electro-mechanical design.

OBSAH

Úvod.....	3
1. Porovnání sekundárních článků použitelných pro pohon elektrických vozidel.....	4
1.1 Lithiové sekundární články	4
1.1.1 LCO.....	4
1.1.2 LMO.....	5
1.1.3 NMC.....	5
1.1.4 NCA	6
1.1.5 LFP.....	6
1.2 Kritéria pro výběr článku, popis aplikace	7
1.3 Zvažované varianty a výsledný zvolený článek	9
2. Elektro-mechanický návrh akumulátorové baterie	14
2.1 Konstrukční omezení a nároky daná pravidly soutěže Formula Student	14
2.1.1 Členění do stacků	14
2.1.2 Elektrická izolace a materiály	16
2.1.3 Systém AMS	18
2.2 Popis aplikace s ohledem na prostředí	20
2.3 Nároky na zástavbu zvoleného článku	20
2.4 Chlazení.....	22
2.5 Výsledný elektromechanický návrh	23
2.5.1 Stack.....	24
2.5.2 Prostorové uspořádání baterie.....	31
2.5.3 Trakční proudová cesta a trasy vodičů.....	34
3. Testování parametrů navržené a vyrobené baterie.....	37
3.1 Oteplení akumulátorové baterie	37
3.2 Vybíjecí charakteristiky a sériový odpor.....	40
3.3 Hmotnost a hustota energie	43
4. Test baterie na reálném vozidle.....	44
Závěr	47
Seznam použitých zdrojů	48
Seznam obrázků, tabulek a grafů	49
Seznam příloh.....	50

Úvod

Již třetím rokem jsem členem sportovního týmu eForce FEE Prague Formula, který za podpory Fakulty elektrotechnické ČVUT v Praze úspěšně staví elektrické formule a účastní se s nimi mezinárodní soutěže Formula Student.

Letošní rok 2015/ 2016 jsem převzal zodpovědnost navrhnout a postavit trakční baterii pro nový monopost FSE_04x. Pokud má navržená baterie konkurovat světové špičce, vyžaduje návrh komplexně se seznámit s nejlepšími dostupnými technologiemi a tyto technologie poté aplikovat při návrhu a výrobě baterie. Pro svou komplexnost a atraktivitu jsem vyhodnotil toto téma jako vhodné ke zpracování v podobě této bakalářské práce.

Cíl práce

Cílem práce je prozkoumat nejnovější možnosti v oblasti špičkových trakčních sekundárních článků, vybrat a obstarat pokud možno nejlepší článek. S použitím vybraného článku vypracovat elektromechanický návrh baterie a jejího vnitřního rozložení, baterii vyrobit, otestovat a nasadit ve voze FSE_04x do závodní sezony. Na konci závodní sezony baterii zhodnotit a předložit zjištění a poznatky, které by mohly přispět pro zlepšení návrhu v další generaci baterie.

1. Porovnání sekundárních článků použitelných pro pohon elektrických vozidel

Základní komponenta, která nejvíce ovlivňuje parametry výsledné baterie, je sekundární článek, nebo též akumulátor, který použijí ke stavbě trakční baterie. Vlastnosti daného článku budou přímo předurčovat vlastnosti celého závodního vozu. Na sekundární článek jsou vzneseny především tyto požadavky: vysoká hustota energie ku hmotnosti i objemu a vysoká bezpečnost. Všechny tyto požadavky musí být vyváženým způsobem naplněny.

1.1 Lithiové sekundární články

V první řadě je nutno zvolit akumulátor z hlediska chemické topologie. Na začátku rovnou opominu staré konvenční technologie, jako jsou akumulátory olovené (Pb), nikl-železné, nikl-zinkové, nikl-kadmiové nebo nikl-metal hydridové, protože mají nízkou hustotu energie a pro špičkové trakční aplikace tak již nemají potenciál. Nejlepších parametrů dnes dosahují obecně akumulátory na bázi lithia. V průběhu několika posledních let prodělaly značný vývoj, který dále pokračuje. Těm jsem se proto v průběhu vývoje věnoval hlouběji a vytvořil jsem následující přehled vlastností významných průmyslově používaných topologií lithiových akumulátorů.

1.1.1 LCO

Lithium-kobalt-oxid (zkráceně LCO) je jedna z nejstarších topologií, její vývoj započal roku 1991. Článek je tvořen kobalt-oxidovou katodou a grafitovou anodou, a to ve struktuře plošných vrstev. Během vybíjecího procesu proudí ionty lithia z anody ke katodě, během nabíjení naopak. Dobrým parametrem těchto článků je jejich vysoká energetická hustota, která se pohybuje v rozmezí 150 – 200 Wh/kg. Další parametry už tak oslnivé nejsou. Nabíjecí a vybíjecí proudy jsou velmi nízké, do 1 C (jednoho násobku své kapacity) a tepelná stabilita je malá, k neřízené exotermické reakci dojde při 150 °C. Životnost těchto článků se pohybuje mezi 500 – 1000 cykly, v závislosti na hloubce vybití, vybíjecím proudům a teplotě. Topologie LCO se uvedla do komerčního

použití jako jedna z prvních a našla uplatnění především v nízkoodběrových zařízeních, jako jsou mobily, tablety, notebooky a podobná drobná elektronika [1].

Dle mého názoru je ale topologie LCO pro trakci podle výše uvedených údajů naprosto nevhodná.

1.1.2 LMO

Topologie lithium-mangan-oxid (zkráceně LMO) patří mezi ty novější, první článek pro komerční účely byl vyroben roku 1996.

Její princip spočívá v použití LiMn_2O_4 jako materiál katody, a to v trojrozměrné spinelové architektuře. To se projevuje lepším prouděním iontů na elektrodě a tedy menším vnitřním odporem. Články jsou tak schopné dosahovat větších nabíjecích i vybíjecích proudů, a to do 3 °C při nabíjení a až 12 °C při vybíjení. Spinelová struktura je však relativně objemná a technologie LMO tak nedosahuje vysoké hustoty energie, pouze 100 – 150 Wh/kg. Kladnou stránkou LMO je bezpečnost, mezní teplota baterie leží okolo 250 °C. Spinelová struktura LMO je též flexibilní pro návrh a umožňuje vývojářům poměrně přesně vybalancovat vlastnosti článku jako životnost, hustota energie a proudové zatížení podle požadavků konkrétní aplikace. Tyto vlastnosti přispěly k tomu, že se technologie LMO v trakci využívá a to i v oblasti prvních sériově vyráběných elektromobilů. Často se také technologie kombinují, například elektromobil Chevy Volt využívá okolo 30 % článků LMO, které se starají o velké proudové výkyvy při akceleraci nebo rekuperaci, zatímco články NMC se starají o uložení co nejvíce energie pro dlouhý dojezd [1].

1.1.3 NMC

Tato topologie, známá též jako NMC, je jedna z vedoucích topologií na poli skladování energie i trakce. Jedná se také o relativně mladou topologii, první použitelný článek byl vyroben až roku 2008. Mezi její přednosti se řadí vysoká energetická hustota pohybující se okolo 150 – 220 Wh/kg, dlouhá životnost v rozsahu 1000 – 2000 cyklů a vysoká bezpečnost s mezní teplotou kolem 210 °C. Nedosahuje tak vysoké proudové zatížitelnosti, jako je tomu u LMO. Nabíjecí proud se nejčastěji pohybuje do 1 C a vybíjecí proud v závislosti na aplikaci 2 – 8 C. Topologie NMC poskytuje podobně jako LMO jistou variabilitu při návrhu. Je možné zaměřit se více na vysokou hustotu energie nebo na proudovou zatížitelnost, velké navyšování proudové zatížitelnosti však značně zhoršuje celkové parametry, a tak většina článků NMC se konstruuje se zatížením do

2–3 C. Topologie NMC se ve velkém využívá při napájení elektroskútrů a elektromobilů, nezřídka v kombinaci s topologií LMO, jak již bylo zmíněno [1].

1.1.4 NCA

Dalších variant lithia s niklem, kobaltem a dalšími kovy je mnohem více, než zde zmíním. Jedna z těch, které se prosadily více, je NCA, která využívá v sloučenině katody také hliník. V komerční podobě existuje od roku 1999 a jejím dominujícím parametrem je velmi vysoká energetická hustota, která dosahuje 200 – 260 Wh/kg. Tento parametr budil značný zájem vývojářů elektromobilů, avšak masivnímu nasazení bránily nízké nabíjecí a vybíjecí proudy pohybující se pouze okolo 1 C. Za vynaložení nemalých prostředků byly vyvinuty modifikace s rychlonabíjecími schopnostmi i možnostmi přetížení při vybíjení. Tím se topologie NCA stala vůdčí v oblasti elektromobility, což dokazuje i použití v nejdokonalejším sériově vyráběném elektromobilu Tesla Model S [1].

1.1.5 LFP

Další topologií, která prodělala masivní rozvoj je LiFePO₄. Její počátky sahají do roku 1996, kdy bylo zjištěno na Univerzitě v Texasu, že lithiový fosfát jako materiál katody vykazuje velmi dobré parametry, nízký vnitřní odpor a vysokou stabilitu. Po dlouhém vývoji mají dnešní články LiFePO₄ následující parametry. Jejich nominální napětí 3,2 V a také energetická hustota 90 – 120 Wh/kg jsou nižší, než je tomu u většiny ostatních článků na bázi lithia. Naproti tomu články vynikají vysokými zatěžovacími proudy, jako je proud nabíjecí 1 – 3 C, proud vybíjecí 10 – 25 C, a také vysokou životností, 1000 – 2000 cyklů. Články jsou také velice stabilní a bezpečné a nezpůsobí požár ani po zkratování plně nabitého článku; bod mezní teploty leží okolo 270 °C. V průběhu vybíjení vynikají články velice plochou vybíjecí křivkou, taktéž výrobní tolerance jsou velice malé [1].

Nově se objevila také verze LiFeYPO₄, což je vylepšení předchozí verze dotováním katody Yttriem. Srovnáním parametrů komerčně dostupných článků jsem zjistil, že vylepšení přispělo k delší životnosti, kde výrobci garantují až 3000 i více cyklů, a také by se mělo projevit na minimalizovaném samovybíjení. Ostatní parametry včetně hustoty energie však zůstávají nezměněny.

Z vlastních zkušeností můžu říci, že články LiFePO₄ i LiFeYPO₄ se pro své vlastnosti používají pro stacionární i mobilní aplikace vyžadující velké výkonové

odběry a vysokou životnost. Jsou to především autonomní energetické systémy využívající obnovitelné zdroje nebo záložní zdroje vyšších důležitostí. Akumulátory složené ze čtyř článků LFP jsou kvalitní a lehčí přímou náhradou za olověné 12 V akumulátory ve všech aplikacích, zejména za startovací autobaterie a do UPS. Vysokovýkonové články LFP jsou také s úspěchem uplatňovány při přestavbách různých vozidel na elektrická. Masivnímu nasazení do továrních osobních elektromobilů brání nízká hustota energie ústící v krátký dojezd, ale pro různá vozidla s krátkými dojezdovými trasami, jako vysokozdvizné a nízkozdvizné vozíky a jiné stavební stroje, jsou články LFP ideální a často využívané řešení.

1.2 Kritéria pro výběr článku, popis aplikace

V minulé kapitole jsem rozebral, jaké základní chemické varianty lithiových sekundárních článků jsou k dispozici. A nyní bylo mým úkolem vybrat jedinou z nich a najít reprezentanta v podobě konkrétního článku, který nejlépe vyhoví požadavkům aplikace. Každá konkrétní aplikace má své konkrétní požadavky a svá specifika a nejdříve je nutné ujasnit si kritéria, podle kterých článek vybírám.

Pro vybrání správného článku potřebuji znát žádaný poměr mezi třemi nejdůležitějšími parametry, kterými jsou hustota energie, životnost a proudová zatížitelnost.

Navrhovaná akumulátorová baterie je určena do závodní elektrické formule. První zájem hned po bezpečnosti je na co nejnižší hmotnosti celé baterie, z čehož vyplývá jednoznačný požadavek na co nejvyšší proudovou hustotu vybraného článku. Tento parametr má nejvyšší prioritu a jeho hodnota není přesně ohraničena. Čím lepší hodnoty se podaří dosáhnout, tím lépe.

Naproti tomu požadovaná životnost článků je relativně velmi malá. Při posouzení potřebné životnosti jsem zohledňoval především fakt, že s rostoucím počtem cyklů mírně klesá kapacita baterie a tento pokles by mohl ohrozit dojezd vozu během závodů. Proto jsem následujícím způsobem odhadl počet cyklů, po které musí být parametry zajištěny. V rámci týmu jsme se shodli na tom, že monopost musí vydržet předsezónní testování a následné závody. Ze zkušenosti z minulých let víme, že během této doby není reálné najet více jak cca 500 km. Při uvážení faktu, že závodním tempem je možné na jedno nabití ujet 22 km, faktu, že většina testovacích jízd bude realizována formou vytrvalostní disciplíny, a při zohlednění jisté rezervy jsem došel k závěru, že baterie musí splňovat požadavky na své parametry přibližně 50 cyklů.

Proudovou zatížitelnost článku je možné a nutné stanovit přesně. Určil jsem ji z požadavků na trakci vozu, konkrétně z požadavků na výkonovou disponibilitu, napětí a celkovou uchovanou energii.

Výkonová disponibilita byla stanovena pravidly soutěže Formula Student, která omezují maximální možný výkon odebíraný z baterie během závodu na 80 kW. Mezi kompetentními osobami v týmu jsme si stanovili, že baterie musí být schopna tento výkon dodat až do nominálního napětí.

Napětí bylo poměrně přesně určeno pravidly soutěže Formula Student. V rámci týmu bylo rozhodnuto, že monopost musí být navržen pro účast na závodech ve Spojených státech amerických, kde je maximální povolené napětí 300 V. Tomu jsem podřídil návrh a využil sériového řazení 72 článků. Zdůvodnění této volby se blíže věnuji v další kapitole. Maximální napětí této konfigurace je 302,4 V, nominální napětí je 259,2 V. Pro další výpočty týkající se maximálního výkonu jsem tedy použil hodnotu napětí 260 V.

Celková uchovaná energie vyplývá z požadavku na dojezd vozu v hlavní dynamické disciplíně soutěže – vytrvalostnímu závodu Endurance. Pro tuto oblast návrhu jsem měl z minulých let velmi málo dat, protože předchozí model nikdy nevyužil naplno svůj výkonový potenciál. Ve spolupráci s našimi mechaniky jsme po zhodnocení mnoha aspektů dospěli k závěru, že vůz FSE_04x bude potřebovat k zvládnutí závodu Endurance energii 6 – 6,5 kWh. Získat přesnější informace jsme v danou chvíli nebyli schopni, proto jsem tuto hodnotu bral jako výchozí pro návrh. Tuto hodnotu jsem dále navýšil o rezervu 15 %, abych minimalizoval riziko, že monopostu navržená energie nebude stačit. Přijatelnější pro tým je vézt si s sebou na závod energie o trochu více, než předčasné vybití baterie několik kol před cílem. Konečnou hodnotu celkové energie jsem tedy navrhl 7 – 7,5 kWh.

Z celkové energie je možno jednoduše spočítat energii obsaženou v každé paralelní skupině článků, která je rovna podílu celkové energie počtem článků v sérii.

$$E_{1s} = \frac{E}{72} = \frac{7\,000\ (7\,500)}{72}$$

Energie jedné paralelní skupiny tedy musí pohybovat okolo hodnoty 100 Wh. Z této energie jsem si vypočítal kapacitu skupiny vztažením kapacity k známému nominálnímu napětí většiny lithiových článků $U_{nc} = 3,6$ V. Podle obecného vztahu pro kapacitu akumulátoru jsem dostal:

$$C = \frac{E1s}{Unc} = \frac{100}{3,6} = 27,7 \text{ Ah}$$

Nyní jsem potřeboval vypočítat maximální proud, který bude z baterie odebírán při plném výkonu z nominálního napětí.

$$I_{max} = \frac{P_{max}}{U_n} = \frac{80\,000}{260} = 308 \text{ A}$$

Tento proud jsem následně vztáhl k požadované kapacitě baterie a proudové zatížení tak vyjádřil v jejích násobcích.

$$\text{Proudová zatížitelnost} = \frac{I_{max}}{C} = 27,7 = 11,1 \text{ C}$$

Hledaný sekundární článek měl tedy nabídnout největší možnou hustotu energie při dovoleném proudovém zatížení minimálně 11 C. Vzhledem k údajům uvedeným v úvodní rešerši by měl používat chemickou topologii NCA. Problém jsem ale spatřoval v požadovaném proudovém zatížení, jelikož NCA takové proudy běžně nedovoluje. Zároveň musel umožnit co nejlépe poskládat pomocí násobků své kapacity požadovanou kapacitu 27,7 Ah.

1.3 Zvažované varianty a výsledný zvolený článek

První oblastí pro hledání článku byl katalog článků firmy Kokam, a.s., jejíž články byly použity pro stavbu trakčních baterií pro formule v předcházejících letech viz. příloha 1 Datasheet článků Kokam.

K dispozici byly prizmatické články Li-pol a vycházejí z neúplných dat výrobce se domnívám, že používaly chemickou topologii NMC.

Nejprve jsem z uvedené nabídky sekundárních článků Kokam hodnotil dva články ze série 205. Konkrétně SLPB 60.205.130 H a SLPB 78.205.130 H. Použitím paralelní dvojice těchto článků bylo možné dosáhnout kapacity 26 Ah nebo 32 Ah. Články disponovaly shodnou hustotou energie 148 Wh/Kg a proudovým zatížením 8 C kontinuálně a 10 C peak. Oba články jsem vyhodnotil jako nepoužitelné vzhledem

k nízké hodnotě hustoty energie i proudového zatížení a také z důvodu, že výsledný rozptýl poskládané kapacity byl příliš vzdálený cíli návrhu.

Dále jsem ze seznamu zvážil ještě článek SLPB 50.43.128 H3, který nabízel při stejné hustotě energie 148 Wh/Kg proudové zatížení 15 C kontinuálně a 30 C peak a poskládáním 12 článků paralelně by se podařilo velmi dobře přiblížit nároku na celkovou kapacitu, která by činila 28,8 Ah. Tento článek jsem vyhodnotil jako nejlepší z celé nabídky, avšak design provedený užitím tohoto článku by měl několik zásadních nevýhod. V první řadě to byla hustota energie, která je velmi nízká, má-li navržená baterie konkurovat světové špičce. Další velká nevýhoda by spočívala v elektromechanické montáži takového množství prizmatických článků, která by byla značně složitá a vyžadovala by velké množství resp. Velkou hmotnost přidaného balastního materiálu.

Nakonec jsem celý katalog článků Kokam opustil se závěrem, že všechny nabízené články jsou zastaralé a nepoužitelné pro návrh této baterie. Úplně jsem upustil od záměru použít prizmatický článek i článek separovaný metodou Li-pol a začal jsem hledat v úplně jiném sortimentu článků.

Začal jsem hledat něco, co by se v dané oblasti dalo označit za „State of art“. Chtěl jsem alespoň poznat nejlepší články na světě a parametry, které je s nimi možno dosáhnout. Záhy jsem se dozvěděl o nových výkonových cylindrických člancích, které moje požadavky začaly naplňovat. Několik různých výrobců mělo ve svém sortimentu článek nápadně podobných parametrů. Mezi charakteristickými rysy těchto článků patří především chemická topologie NCA, metoda separace Li-ion, unifikované cylindrické pouzdro 18650 optimalizované pro bodové sváření, kapacita pohybující se kolem 2,5 Ah a hustota energie dosahující až 200 Wh/Kg.

Prohledal jsem všechny na internetu dostupné články a omezil svůj výběr na tři nejlepší články, tedy články, které podle dostupných údajů naplňovaly nejlépe mé požadavky. Zde musím uvést, že na tomto poli nebylo dostupných údajů k dispozici mnoho. Většina těchto článků totiž není určena pro komerční prodej, ale jen pro tzv. OEM aplikace. V praxi to znamená, že výrobce si nasmlouvá odbyt u velkých zpracovatelů a výrobců baterií a jim předá detailní informace a datasheety, na které se vztahuje smlouva o utajení. To, co lze o těchto člancích nalézt na internetu, jsou potom datasheety uniklé nebo falešné a není jednoduché rozhodnout, nakolik kterým informacím věřit.

Jak jsem již výše uvedl, zaměřil jsem se na tři nejlepší články, o kterých jsem našel zmínky existence. Můj cíl byl získat k těmto článkům detailní specifikace, získat kontakt na dodavatele, objednat dostatečný počet kusů a postavit z těchto článků funkční baterii, a to celé v průběhu několika měsíců před začátkem závodní sezony.

Uvedené tři nejlepší články byly konkrétně:

- Samsung INR18650-25R
- Sony VTC-5
- Sony VTC-6

Sestavil jsem pro přehlednost tabulku parametrů, které mi byly známy. Od několika dodavatelů jsem postupně získal originální datasheety s většinou potřebných údajů pro návrh baterie. Datasheet od článku Samsung 25R uvádím v seznamu zdrojů [3]. Datasheety od článků Sony zde nemohu zveřejnit, protože si to dodavatel nepřál. Klíčové údaje jsem však shrnul do zmíněné tabulky, kterou uvádím níže jako tabulku 1 – Klíčové parametry článků.

Hodnoty jsou buď přímo opsané z tabulky, nebo odečtené z grafu. U opsaných hodnot jsem počet desetinných míst zachoval, u hodnot odečtených z grafu jsem přesnost odhadl. Klíčové hodnoty, podle kterých jsem provedl srovnání, jsou označeny žlutým polem, přičemž lepší parametr je označen tučně zeleně.

Současně s datasheetem od článku Sony VTC-5 mi přišlo od dodavatele vyjádření, že poptávaný článek Sony VTC-6 je ještě ve vývoji a není připraven v jakémkoli množství pro naši aplikaci. Tím jsem ho vyloučil z výběru a zůstali pouze Samsung 25R a Sony VTC-5.

Při porovnání těchto dvou článků je jasně vidět, že prakticky ve všech parametrech je lepší Sony VTC-5, má nepatrně menší hustotu energie, ovšem rozdíl oproti článku Samsung 25R však není větší než půl procenta. Sony VTC-5 byl pro mou aplikaci jednoznačně nejlepší článek, byl jsem nicméně připraven použít i Samsung 25R v případě, že by se mi Sony VTC-5 nepodařilo obstarat.

Název článku	Samsung 25R	Sony VTC-5	Sony VTC-6
Úplný název článku	INR18650-25R	US18650VTC5	US18650VTC6
Typická hmotnost [g]	43,8	44,3	46,6
Typický objem [m3]	1,71E-05	1,71E-05	1,71E-05
Maximální napětí [V]	4,2	4,2	4,2
Nominální napětí [V]	3,6	3,6	3,6
Cut-off napětí [V]	2,5	2,5	2,5
Kapacita $I_d=0,2C$ [Ah]	2,56	2,6	2,9
Kapacita $I_d=10A$ [Ah]	2,54	2,58	
Energie $I_d=0,2C$ [Wh]	9,35	9,36	10,44
Energie $I_d=10A$ [Wh]	8,74	8,8	
Kapacita $I_d=0,2C$ (50cyklů) [Ah]	-	2,5	
Kapacita $I_d=10A$ (50cyklů) [Ah]	-	2,5	
Kapacita $I_d=20A$ (50cyklů) [Ah]	2,4	-	
Energie $I_d=0,2C$ (50cyklů) [Wh]	-	9	
Energie $I_d=10A$ (50cyklů) [Wh]	-	8,46	
Energie $I_d=20A$ (50cyklů) [Wh]	7,7	-	
Nabíjecí proud standartní [A]	1,25	2,5	
Nabíjecí proud $I_{maxCont}$ [A]	4	4	
Vybíjecí proud $I_{maxCont}$ [A]	20	30	40
Proudová zatížitelnost konst. [C]	7,8	11,5	13,8
Vybíjecí proud $I_{maxPeak}$ [A]	60	80	
Proudová zatížitelnost peak [C]	23,4	30,8	
Hustota en. hm. typická [Wh/kg]	213,5	211,3	224,0
Hustota en. hm. reálná [Wh/kg]	199,5	198,6	
Hustota en. obj. typická [kWh/m3]	546,4	547,0	
Hustota en. obj. reálná [kWh/m3]	510,7	514,2	

Tabulka 1 – Klíčové parametry článků (vlastní zpracování)

Pro zajímavost uvádím některé důležité vlastnosti, kterými oba uvedené články disponují. Tyto cylindrické články jsou mnohem bezpečnější než srovnatelné články prizmatické. Jejich konstrukce z taženého plechu obsahuje při kladné elektrodě bezpečnostní ventil, který uvolní případný přetlak uvnitř článku a zároveň přeruší elektrický obvod, čímž odpojí uvnitř článků od paralelní skupiny. Stejným způsobem se zachová, pokud dojde k zatížení nadměrným proudem nebo zkratem, jelikož ventil je

v určitém bodě dimenzován pro přetavení. Detailní pohled nabízí Obrázek xx - Circuit interrupt device vložený níže.

Jeden z datasheetů dokumentuje testování sérií vždy 5 článků nejprve mechanickým zatížením nárazem a deformací a žádný z testovaných článků nezměnil stav. Jiná pětice byla vystavena přebíjí zdrojem 20 A, 20 V, další zkratována odporem 10 mΩ při pokojové teplotě, poslední pak vystavena teplotě 140 °C. Nejhorší zaznamenanou reakcí bylo uvolnění vnitřního přetlaku bezpečnostním ventilem bez kouře nebo plamene. Pokud by tímto způsobem byly testovány srovnatelné články Li-pol prizmatické, je velmi pravděpodobné, že by některý z testů skončil reakcí otevřeným plamenem, případně explozí.

Články evidentně používají chemickou topologii NCA, ale přinejmenším Sony, Panasonic a další používají jako materiál anody místo čistého grafitu grafito-křemíkový kompozit. V důsledku se podařilo dosáhnout výjimečné hodnoty hustoty energie, jejíž typická hodnota překračuje 210 Wh/kg. Pokud budeme při výpočtu uvažovat reálnou kapacitu se zohledněním vysokého vybíjecího proudu, stále se hodnoty pohybují okolo cca 200 Wh/kg.

Další inovace spočívá v zabránění vnitřních zkratů na separátoru cizími částicemi, které se mohou mezi vrstvy dostat při výrobě. S náhlými vnitřními zkraty mám zkušenosti z baterie předchozího modelu formule, kde jsou použity prizmatické články Kokam. Z celkového počtu 216 článků došlo u třech z nich k celkovému vnitřnímu zkratu, nafouknutí článku a úniku výparů. Jako zázrakem nedošlo k závažnějším komplikacím. Podle vyjádření jednoho z dodavatelů se u těchto článků jedná o běžný jev. Uvedené cylindrické články používají jako separátor kromě standardního polyethylenu také tenkou vrstvou odolnou vysoké teplotě, která zabraňuje šíření zkratu z bodu jeho vzniku. Zkrat tak zanikne odtavením elektrody v místě zkratu a dále se nešíří, díky čemuž může článek nadále plnit svou funkci v provozu. Jak dalece je tato technologie funkční, ukáže statistika na konci závodní sezony. S dodavateli se nakonec podařilo vyjednat rezervaci 1000 ks článků Sony VTC-5 na centrálním skladě. Do ostrého provozu jich bude nasazeno 792, náhradní stack nepočítaje.

2. Elektro-mechanický návrh akumulátorové baterie

Elektro-mechanický návrh je stejně jako výběr článku též velmi komplexní téma. Předmětem tohoto návrhu je konkrétní podoba a struktura baterie a zapracování trakčního článku do ní.

2.1 Konstrukční omezení a nároky daná pravidly soutěže Formula Student

Soutěž Formula Student poměrně přísně a konkrétně definuje na celý vůz různé požadavky, se kterými jsem se musel v oblasti trakční baterie řídit. V zájmu zachování objektivit jsem se rozhodl přeložit pravidla doslovně a citovat je přímo, i přes jejich velký rozsah. Volným překladem je velmi jednoduché uváděné požadavky zkusit.

2.1.1 Členění do stacků

V zájmu bezpečnosti při provozu a údržbě pravidla soutěže Formula Student (dále jako „pravidla FS“) požadují, aby celkový počet článků byl rozdělen do mechanicky nezávislých samostatných segmentů, takzvaných stacků (j.č. stack, čti „stek“). Požadavky jsou definovány pravidly EV1.1.5 a EV3.4.11 následovně:

„EV1.1.5 Akumulátorové segmenty jsou dílčí části baterie a musí respektovat limit jak maximálního napětí, tak uchované energie. Rozdělení baterie na menší segmenty je zamýšleno za účelem snížit riziko spojené s prací na baterii.

EV3.4.11 Akumulátorové segmenty obsažené v baterii musí být odděleny elektricky nevodivou a ohnivzdornou bariérou (dle UL94-V0, FAR25 nebo ekvivalentní) a musí rozdělovat baterii do segmentů uchovávajících energii maximálně 6 MJ, pokud už nedošlo k separaci kvůli maximálnímu napětí stacku 120 V.

Poznámka: Uchovávaná energie je počítána použitím maximální hodnoty napětí a nominální kapacity použitých článků. Separace do stacků musí být dokumentovaná v ESF.“ [2]

V návrhu baterie jsem byl při volbě počtu stacků omezen především uchovávanou energií. Můj požadavek zároveň byl, aby počet stacků bylo sudé číslo, protože výsledná baterie bude symetrická a lépe se bude zapracovávat z hlediska prostorového

uspořádání. K propočtům a následnému rozhodnutí jsem použil následující tabulku xx, do které jsem uvedl všechny důležité údaje.

Nejprve jsem do jednoho sloupce zanesl hodnoty společné všem variantám a dále pokračoval hodnotami, které jsou závislé na použitém článku a jeho počtu v paralelní skupině. Následně jsem zeleně označil hodnoty, které nejlépe odpovídaly mým požadavkům a červeně ty, které požadavky nesplňovaly. Z uvedených hodnot je vidět, že jsem se rozhodl použít v každé paralelní skupině 11 článků Sony VTC-5.

Fakt, že je Sony VTC-5 lepší než Samsung 25R, jsem již vysvětlil výše. Počet článků v paralelní skupině jsem určil hlavně na základě výsledné kapacity baterie, která by při použití 10 ks byla příliš malá a při použití 12 ks zbytečně velká. Mezi 11 a 12 články jsem delší dobu váhal, nakonec jsem se ale z výše uvedených důvodů rozhodl pro 11 článků. Hmotnost všech článků v baterii měla podle výpočtu činit cca. 35 Kg. To je přibližně polovina hmotnosti článků baterie použité v monopostu minulé generace.

Článků sériově	72					
Počet stacků	6					
Článků sériově na stacku	12					
Maximální napětí [V]	302,4					
Nominální napětí [V]	259,2					
Koncové napětí [V]	180					
Maximální napětí stacku [V]	50,4					
Nominální napětí stacku [V]	43,2					
Koncové napětí stacku [V]	30					
Použitý článek	Samsung 25R			Sony VTC-5		
Článků paralelně	10	11	12	10	11	12
Celkový počet článků	720	792	864	720	792	864
Kapacita typická [Ah]	25,60	28,16	30,72	26,00	28,60	31,20
Kapacita reálná [Ah]	25,39	27,93	30,47	25,77	28,35	30,92
Kapacita reálná (50cyklů) [Ah]	24,00	26,40	28,80	25,00	27,50	30,00
Energie typická [kWh]	6,64	7,30	7,96	6,74	7,41	8,09
Energie reálná [kWh]	6,58	7,24	7,90	6,68	7,35	8,02
Energie reálná (50cyklů) [kWh]	6,22	6,84	7,46	6,48	7,13	7,78
Energie typická [MJ]		30,66	33,44		31,14	
Energie stacku [MJ]		5,11	5,57		5,19	
Hmotnost článků ve stacku [kg]		5,78	6,31		5,85	
Vybíjecí proud max. cont. [A]	200	220	240	300	330	360
Vybíjecí proud peak [A]	600	660	720	800	880	960
Hmotnost článků [kg]	31,54	34,69	37,84	31,90	35,09	38,28
Hustota en. hm. typická [Wh/kg]	213,47			211,29		

Hustota en. hm. reálná [Wh/kg]	199,54			198,65		
Hustota en. obj. typická [kWh/m ³]	546,37			546,96		
Hustota en. obj. reálná [kWh/m ³]	510,73			514,23		
Celkový nabíjecí proud [A]	40	44	48	40	44	48
Čas potřebný k nabití [min]	38,4			39		
Výkon nabíječek [kW]	10,37	11,40	12,44	10,37	11,40	12,44

Tabulka 2 – Přehled možných konfigurací (vlastní zpracování)

2.1.2 Elektrická izolace a materiály

Podmínky pro návrh z hlediska elektrické izolace obecně upravují následující pravidla FS:

„EV1.2.1 Jako trakční systém vozidla je definována jakákoli součást, která je vodivě spojena s motory nebo trakční baterií.

EV1.2.2 Jako uzeměný nízkonapěťový (GLV) systém je definovaná každá elektrická část, která není částí trakčního systému.

EV1.2.3 Trakční systém musí být kompletně izolován od šasi a jakýchkoli jiných vodivých částí vozu.

EV1.2.7 Trakční a GLV systémy musí být od sebe kompletně galvanicky odděleny. Hranice mezi trakčním a GLV systémem je galvanické oddělení mezi oběma systémy. Tudiž nějaké komponenty, jako například motor controller, mohou být součástí obou systémů.

EV1.2.8 Všechny komponenty v trakčním systému musí být dimenzovány na maximální napětí trakčního systému.

Konstrukci samotné baterie a vodivých cest upravují následující pravidla:

EV3.3.1 Pokud je kontejner baterie vyroben z elektricky vodivého materiálu, potom musí být póly stacků a článků izolovány od vnitřních stěn kontejneru izolačním materiálem, který je dimenzován na maximální napětí trakčního systému. Všechny vodivé povrchy na vnější straně kontejneru musí být propojeny nízkoimpedančním spojením na zem GLV systému, viz pravidlo EV4.3. Zvláštní pozornost musí být věnována zajištění, aby vodivým předmětům, jako upevňovací konstrukce, bylo adekvátně zabráněno propíchnutí izolační bariéry.

EV3.3.3 Při návrhu musí být použity servisní konektory (Maintenance plugs), přídatné konektory a podobně, které zajistí elektrické rozpojení stacků baterie od sebe

tak, aby na každém stacku zůstalo napětí maximálně 120 V a energie maximálně 6 MJ. Rozpojení se musí uskutečnit na obou pólech stacku.

Toto rozpojení musí být použito vždy, pokud je kontejner baterie otevřen kvůli údržbě a vždy při vyjmutí stacku z kontejneru.

Nejsou akceptovány servisní konektory vyžadující k rozpojení nářadí.

Servisní konektory musí obsahovat mechanickou pojistku, která zabrání náhodnému rozpojení.

Servisní konektory musí být nevodivé na plochách, které neplní funkci elektrického spojení.

EV3.3.4 Každý segment musí být elektricky izolován vhodným materiálem mezi dalšími segmenty a na vrchu segmentu tak, aby se předešlo výboji mezi segmenty samotnými nebo výboji v důsledku nechtěného upuštění předmětu/ nářadí do kontejneru baterie, například při údržbě. Vzduch v tomto případě není považován za vhodný izolant.

EV3.3.2 Každý kontejner baterie musí obsahovat minimálně jednu pojistku a minimálně dva Izolační odpojovače baterie (AIR), viz EV3.5 a EV6.1.

EV3.3.5 Izolační odpojovače baterie (AIRy) a hlavní pojistka musí být odděleny od zbytku baterie elektricky nevodivým a dle UL94-V0 ohnivzdorným materiálem. Vzduch v tomto případě není považován za vhodný izolant.

EV3.3.8 Každý vodič použitý v akumulátorovém kontejneru musí být dimenzovaný na maximální napětí trakčního systému nehledě na to, jestli je vodič součástí trakčního nebo GLV systému.

EV3.3.7 Kontaktování/ propojování jednotlivých článků pájením v proudové cestě je zakázáno. Pájení vodičů k článkům za účelem monitorování systémem AMS je dovoleno, pokud tyto vodiče nejsou součástí proudové cesty.“ [2]

Výše uvedené náležitosti utvořily základ mého návrhu. Doplním, že kontejner baterie byl vyroben z uhlíkového kompozitu a byl tedy na všech plochách vodivý. Z toho vzešel nárok, aby byly stacky odizolovány po celém povrchu, vyjma ventilačních otvorů. Jak je obvyklé v konstrukci obdobných trakčních baterií, součástí trakční baterie musí být také trakční pojistka a dvojice izolačních odpojovačů (AIRů), pro které jsem v konstrukci musel nalézt vhodný prostor a zabezpečit je podle výše uvedených pravidel. Součástí baterie jsou také další řídicí jednotky a zařízení, které musí být

v baterii rovněž umístěny. Mezi ně patří i moduly AMS, jejichž význam je natolik důležitý, že jim věnuji vlastní kapitolu.

2.1.3 Systém AMS

Nedílnou součástí trakční baterie je i monitorovací systém, který se stará o bezpečnost provozu. Říká se mu Accumulator management system (AMS) nebo také Battery management system (BMS). Jeho princip činnosti spočívá v měření teploty a napětí článků a případná reakce, pokud měřené parametry přesáhnou bezpečné meze. Kromě zajištění bezpečnosti je jeho úkolem také balancování paralelních skupin článků na stejné napětí a zajištění využitelnosti plného rozsahu kapacity baterie.

Pravidla FS kladou na systém AMS následující požadavky:

„EV3.6.1 Každá baterie musí být monitorována monitorovacím systémem baterie, kdykoliv je trakční systém aktivní nebo je baterie připojena k nabíječce. Při užití v bateriových systémech se standardně tento systém označuje jako Battery management system (BMS), nicméně v této soutěži jsou povoleny i alternativní způsoby uložení energie a proto bude v tomto dokumentu používáno označení AMS.

EV3.6.2 AMS musí nepřetržitě měřit napětí na každém článku za účelem udržet články v mezích minimální a maximální hodnoty, které jsou stanoveny v datasheetu článku. Pokud jsou články propojeny paralelně, je nutné měřit pouze jednu hodnotu napětí.

EV3.6.3 AMS musí nepřetržitě měřit teploty kritických bodů v baterii, za účelem udržení článků pod maximální dovolenou teplotou určenou v datasheetu článku nebo pod hodnotou 60 °C, jakkoli je tato hodnota menší.

Teplota článku musí být měřena na záporném pólu každého článku a použitý senzor musí být v přímém kontaktu buď přímo se záporným pólem článku nebo se přípojnici, a to méně než 10 mm od záporného pólu.

EV3.6.4 Pro centralizované systémy AMS (dva nebo více článků na modul AMS) platí, že všechny měřicí vodiče pro měření napětí musí být chráněny pomocí „fusible link“ vodičů nebo pojistek tak, aby žádný z měřících vodičů nemohl přesáhnout svoji dimenzovanou proudovou zatížitelnost v případě zkratu. Jištění musí být provedeno ve vodiči, drátu nebo vodivé cestě v plošném spoji, které jsou přímo napojeny na vývod článku.

Jakýkoli distribuovaný systém AMS (jeden měřený článek na modul), kde jsou měřicí přívody na desku větší, než 5 mm nevyžaduje přídatné jištění, pokud je proti zkratu jištěn přívod i samotný modul AMS. Pokud nejsou tyto náležitosti dodrženy, musí být přívod od kladného pólu článku jištěn pomocí vodiče „fusible link“.

Kde je to zapotřebí, může vodič „fusible link“ tvořit celý měřicí vodič nebo jeho část. Pokud tvoří vodič „fusible link“ část měřicího vodiče, potom musí být průřez vodiče „fusible link“ nadimenzován tak, aby chránil zbytek měřicího vodiče před překročením jeho proudového zatížení. Pokud na jakémkoli z těchto „fusible link“ vodičů dojde k přetavení nebo přerušeni jakýmkoliv způsobem, musí to být detekováno systémem AMS a vyhodnoceno jako kritický problém napětí.

Poznámka 1: Pokud je nutné použít „fusible link“ a odpor spojení modulu AMS s článkem bude příliš velká, může to ovlivnit měření napětí systémem AMS, obzvláště během nabíjení a balancování článků. Proto je nutné použít vodič s řádně nadimenzovaným průřezem.

Poznámka 2: Vodiče „fusible link“ fungují tak, že pokud nastane situace nadproudu, vodič se přetaví, přičemž izolace vodiče zajistí, že roztavený kov zůstane uvnitř. Jsou k dispozici specifické produkty, které naplňují popsanou funkci.

EV3.6.5 Jakékoliv spojení systému GLV se systémem AMS musí být galvanicky izolované od trakčního systému.

EV3.6.6 Pro články na bázi lithia platí, že musí být systémem AMS měřena teplota alespoň 30 % článků. Monitorované články musí být rovnoměrně rozloženy v objemu baterie.

Poznámka: Je akceptovatelné měřit více článků jedním senzorem, pokud je tento senzor v přímém kontaktu se všemi monitorovanými články.

EV3.6.7 Systém AMS musí vypnout trakční systém rozpojením AIRů, pokud detekuje napětí nebo teplotu mimo bezpečný rozsah deklarovaný výrobcem, a to při zohlednění přesnosti měření. Pokud systém AMS vypne trakční systém, musí se v kokpitu pro potvrzení rozsvítit červená LED označená AMS.

Poznámka: Je důrazně doporučeno měřit teplotu každého článku.“ [2]

Jak je vidět, požadavky na systém AMS jsou definovány relativně striktně. Najít z hlediska hmotnosti co nejlehčí a nejkompaktnější řešení a zároveň zohlednit všechny

nezbytné nároky na systém byla velká výzva. Samotný stack jsem navrhl jako velmi kompaktní kvádr a zakomponování množství senzorů do jeho konstrukce nebylo jednoduché. Na moduly systému BMS byl navíc kladen další požadavek, a to je ovládání ventilátorů pro chlazení stacků. Tato vlastnost musela být do jejich návrhu rovněž integrována.

2.2 Popis aplikace s ohledem na prostředí

Při návrhu baterie jsem musel vzít v úvahu i další faktory, které přímo vyplývají z charakteru aplikace. Závodní formule je aplikace vyžadující velkou odolnost konstrukce proti přetížení a vibracím. Pravidla FS definují bodem EV3.4.6 předepsanou odolnost přetížení 40 G podélně a příčně a 20 G vertikálně, nicméně pouze pro samotný kontejner. Osobně ovšem považuji za důležité, aby podobné podmínky vydržely i ostatní komponenty. Mým záměrem bylo navrhnout konstrukci tak, aby byla bezpečnost násobena a aby i při selhání některých vnějších komponent vnější ochrany zůstala vnitřní bezpečnost stacků stále neporušena. To se týká jak přetížení, tak vibrací i vniknutí případných uvolněných těles z jiných částí baterie.

Další z nepříznivých faktorů, se kterým bylo potřeba při návrhu počítat, byla vlhkost. Formule Student musí bezproblémově fungovat i za deště. Pravidla FS doporučují v bodě EV4.5.3 dimenzovat všechny součásti trakčního systému na proti vodě ve formě mlhy, kapek nebo deště. Doporučený stupeň krytí podle standardu IP je IP65, což znamená ochrana proti prachu úplně a proti tryskající vodě [4].

Dosud jsem zvažoval varianty, jak může prostředí ovlivnit provoz baterie, ale za důležité také považuji zvážit, jak může provoz baterie ovlivnit prostředí. Zásadním parametrem je zde indukčnost proudové cesty. Pokud bych se nesnažil o její minimalizaci, mohly by pulzní odběry vyzařovat do okolí nežádoucí elektromagnetické rušení. To je nežádoucí zvláště proto, že přímo nad baterií bude ve voze instalován frekvenční měnič pro pohon zadní nápravy a řídicí jednotka zadní části vozu. Vysoká indukčnost baterie by taky měla nepříznivý vliv na chod frekvenčního měniče, obzvláště při skokových změnách požadovaného proudu. Můj záměr byl vlastní indukčnost baterie co nejvíce minimalizovat.

2.3 Nároky na zástavbu zvoleného článku

Při návrhu konkrétní podoby stacku považuji za nezbytné respektovat zástavbové dispozice článku. Jsou to zejména jeho rozměry, navržený způsob kontaktování a

mechanické uložení pomocí podpůrné struktury. Po zvážení všech uvedených skutečností je pak možné dospět k finálnímu návrhu.

Pro stavbu baterie byl zvolen článek US18650VTC5. Jedná se o cylindrický článek v unifikovaném pouzdru lithiových článků 18650, a bez ochranného pcb modulu. Základní rozměry jsem podle datasheetu výrobce shrnul do následující tabulky – tabulka xx. Dle těchto rozměrů je možné uvažovat článek jako jednoduchý válec definovaný výškou a průměrem.

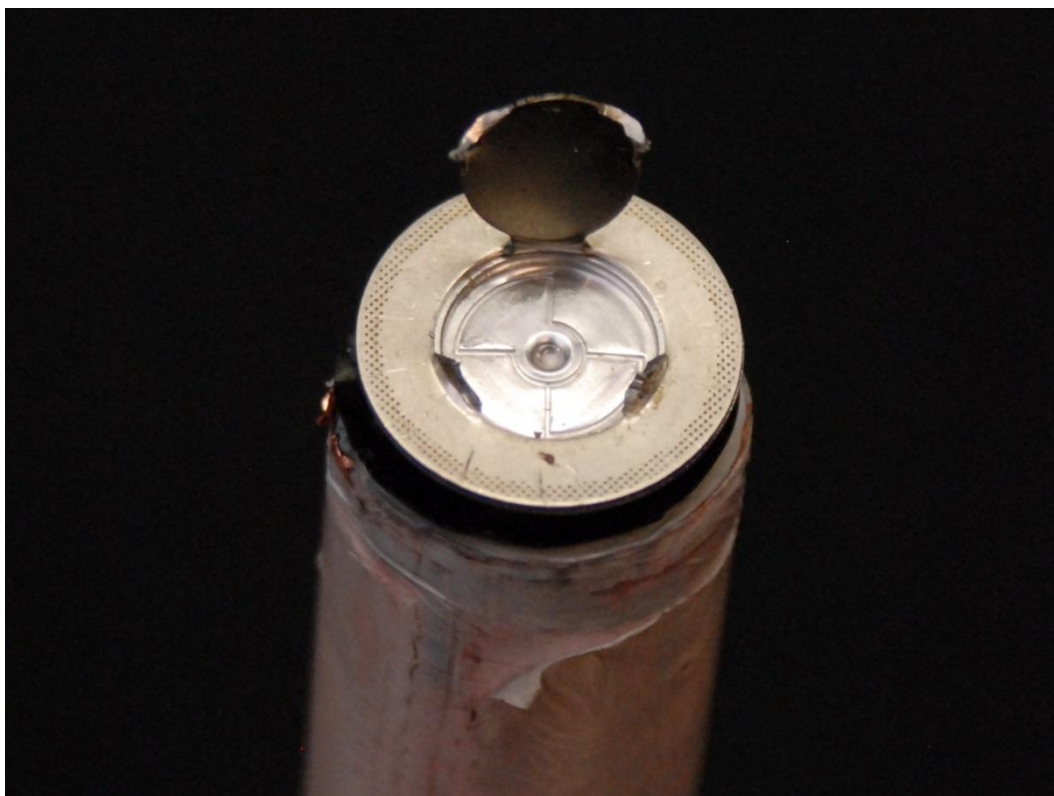
Článek je navržen pro elektromechanickou zástavbu navařením vodivého plechu na póly článku pomocí bodového sváření. Plocha, na které může být umístěn svár je omezena jednak na kladném pólu, jehož průměr je uveden v tabulce níže, a také zakázaným pásmem na záporném pólu, a to kruhem o průměru 3 mm ve středu článku. Do získaného mezikruží by se měl vejít navržený bodový svár.

Na bodovém svařování článků jsem spolupracoval se specializovanou firmou. Z její strany vznikl požadavek na zjištění tloušťky plechu na obou pólech, tato informace byla klíčová k určení tloušťky plechu a návržení samotného bodového svaru. Jelikož výrobce tyto informace neuvádí ani v originálním datasheetu, vyhodnotil jsem v dané situaci jako nejefektivnější řešení jeden článek rozpreparovat a potřebné údaje fyzicky změřit. Tento záměr jsem realizoval a změřené hodnoty přidal do tabulky níže. Měření jsem provedl rameny pro vnější měření posuvného měřítka s přesností 0,01 mm na řezu, který byl pečlivě zbaven otřepů. Vzhledem ke zkušenostem v oblasti článků 18650 a také vzhledem k ceně vzorků jsem usoudil, že výrobní odchylka daného článku nebude větší než tolerance vnějších rozměrů článku a tedy není nutné měření opakovat na více vzorcích. Naměřené údaje považuji za hodnověrné s přesností 0,03 mm, což je pro návržení bodového svaru dostačující.

Průměr na pólu	18,2 + 0,15/-0,2mm
Průměr těla	18,2 +0,15/-0,2mm
Celková výška	65,0 ± 0,2mm
Průměr kladného pólu	7,4 mm
Průměr zakázaného kruhu	3 mm
Tloušťka plechu + pól	0,4 ± 0,03mm
Tloušťka plechu - pól	0,3 ± 0,03mm

Tabulka 3 – Rozměry článku (vlastní zpracování)

Při rozpreparování článku jsem rovněž zjistil důvod zakázaného kruhu pro sváření. Zde je totiž z vnitřní strany navařen vývod ze svitku. Podle mého názoru se takto výrobce jistí, aby případný vnější svár v tomtéž místě nenarušil svár vnitřní. Na obrázku 1 – Circuit interrupt device jsem zachytil detail bezpečnostního ventilu po rozpreparování článku.



Obrázek 1 – Circuit interrupt device (vlastní zpracování)

2.4 Chlazení

Požadavky na chlazení byly velice obecné. Nedisponoval jsem žádnými daty z minulých let, ani žádnými daty z měření článků VTC-5. Při návrhu jsem byl velmi omezen časem, protože záměr byl dokončit návrh v den přibližné dodávky článků, abych mohl okamžitě zahájit výrobu. Návrh jsem byl tedy nucen provést takzvaně „naslepo“.

Zásadní otázka byla vzhledem k tomu, že cylindrické články uspořádané do pravoúhlé, hexagonální nebo obdobné matice k sobě nikdy nedoléhají tak jako články prismatické, vzniká ideální příležitost tento vnitřní prostor jednoduše ohraničit, izolovat a použít jako kanál pro průtok chladicího vzduchu. Naopak chlazení vodou by vyžadovalo značně složitějšího řešení s použitím speciálních kanálů pro chladivo a

rychlospojek na úrovni mimo stacky. Chlazení vodou by se taktéž velmi negativně projevilo na hmotnosti celé baterie. Na základě výše uvedeného jsem se jednoznačně rozhodl pro aktivní chlazení okolním vzduchem.

Další úkol byl definovat požadovaný výkon chladicího systému. Zde se nabízí otázka, zdali výše zvolený způsob chlazení vůbec dokáže dostatečný výkon poskytnout. Upřímně jsem si jistý příliš nebyl, ale nebyla jiná cesta, neboť jsem neměl časové ani materiální dispozice k realizaci spolehlivého vodního chlazení.

Během provozu se bude baterie zahřívat výkonem, který sestává především z ohmického odporu uvnitř a vně článků. Ztrátový výkon vně článků je generovaný v propojovacích vodičích a bodových svarech. Pro výkon generovaný uvnitř článků je potřeba znát střední proud při závodu a vnitřní odpor článku. S dostatečnou přesností jsem neznal ani jeden údaj. Očekávaný ztrátový výkon byl ve spolupráci s ostatními členy týmu velmi hrubě odhadnut na 0,5-2 kW. Zde jsem uvážil skutečnost, že není nutné celý tento výkon aktivně chladit, ale vzniklé teplo se může akumulovat v tepelné kapacitě samotných článků. Během závodu může teplota článků pozvolna růst do určité meze. Z hlediska pravidel FS je tato mez 60 °C, z hlediska údajů výrobce 80 °C. Dalším zvažovaným faktem také je, že účinnost chlazení při vyšších teplotách roste.

Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem jsem se rozhodl použít chlazení okolním vzduchem a při návrhu mechanické části klást důraz na případnou rozšiřitelnost výkonu jednoduchým způsobem.

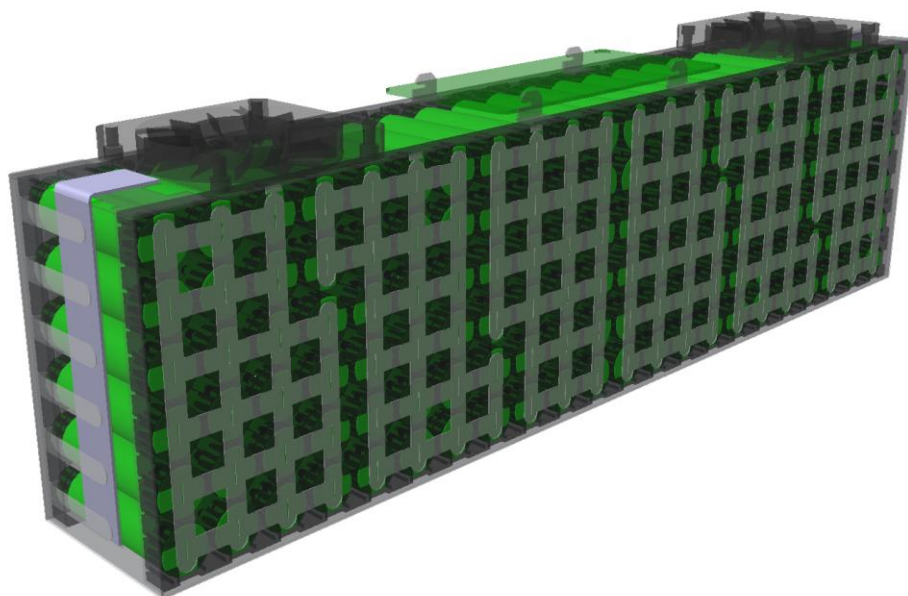
2.5 Výsledný elektromechanický návrh

Konečnému elektromechanickému návrhu nepředcházela žádný prototyp, ani simulační model. V průběhu vypracování návrhu jsem zvažoval vždy více výše uvedených požadavků současně, návrh neustále měnil, ladil a konzultoval s ostatními kolegy v týmu, kteří byli zodpovědní za oblasti části vozu, které na mou oblast navazovaly. Z těchto důvodů je podle mého názoru složité a neefektivní popisovat celou cestu, jak jsem dospěl k finálnímu řešení, chronologicky. Místo toho představím finální podobu návrhu a každé finální řešení náležitě odůvodním.

Po zkušenostech z minulých let v oblasti práce v týmu považuji za důležité najít a definovat hranice mezi dílčími konstrukčními celky, obzvlášť pokud za jejich návrh odpovídají různí lidé, a to tak, aby hranici definovalo co nejméně parametrů.

2.5.1 Stack

V rámci navrhované baterie je nejnápadnějším dílčím celkem stack. Základní konstrukci jsem navrhl jako modul, který se v trakční baterii šestkrát opakuje. Průřez finálním stackem zachycuje obrázek 2 – Stack.



Obrázek 2 – Stack (vlastní zpracování)

Jádrem stacku je podpůrná struktura článků. Ta vymezuje vzdálenost článků od sebe a zajišťuje základní mechanickou stabilitu. Použil jsem modulární plastový systém přímo určený pro pouzdra 18650. Jednotlivé moduly na 2 nebo 3 články lze spojit pomocí rybinových zámků a výsledná matice je pravoúhlá. Hlavními argumenty pro výběr tohoto systému byly zaprvé fakt, že je unifikovaný a používaný v mnoha aplikacích, tedy vyžadoval minimum práce pro dosažení vysoké funkčnosti, a zadruhé byl dobře k dostání. Systém jsem shledal též jako ekonomicky optimalizovaný, což se ve výsledku projevuje nízkou hmotností, kterou jsem také v této aplikaci ocenil.

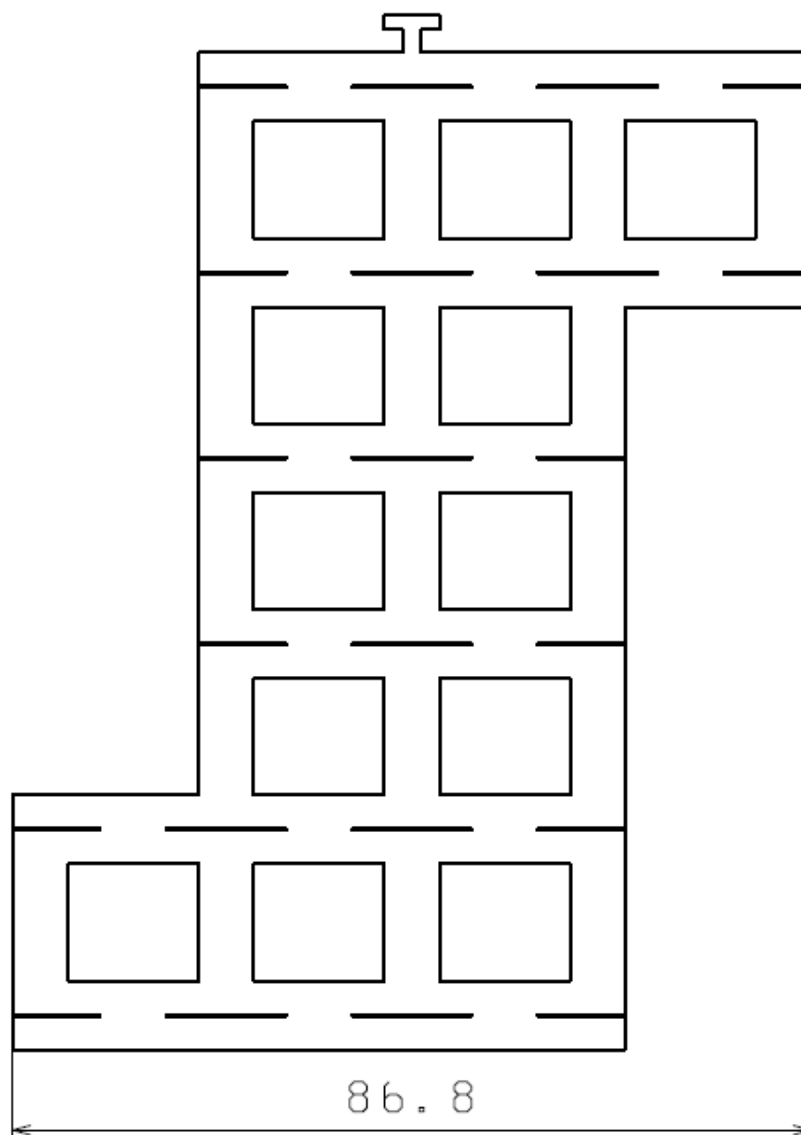
Články jsou do podpůrné struktury zasazeny v žádoucím směru až na doraz a následně na ně jsou nakontaktovány propojovací plechy. Tím dojde k zamčení podpůrné struktury tak, že se nemůže rozevřít směrem od článku. Podpůrná struktura tvoří obdélníkovou plochu na každém konci článku a mezi nimi vznikne prostor, který bude po uzavření ostatních stěn fungovat jako kanál pro průtok chladicího vzduchu.

Jako druhou hlavní mechanickou součást stacku jsem zvolil obložení z materiálu FR4. Jedná se o kompozit skelných vláken a pryskyřice, který jednak splňuje protipožární a elektrické požadavky dané pravidly FS a zároveň je pružný a má dobrou mechanickou odolnost. Z tohoto materiálu jsem navrhl obložení sestávající

z obdélníkových dílů různé tloušťky, které budou tvořit vnější obal stacku. Na všech stranách, které uzavírají chladicí kanál, (tzn. spodní, přední, zadní a vrchní) jsem se rozhodl toto obložení napevno přilepit epoxidovou pryskyřicí k podpůrné struktuře, protože tak dojde k výraznému celkovému zpevnění konstrukce na krut a protože není důvod, proč by měly být tyto části obložení odnímatelné. S lepením FR4 epoxidovou pryskyřicí mám z minulých let velmi dobré zkušenosti, je velmi dobrá pro zakapání spár a vytvoření v kombinaci s kompozitem jednolitého celku, což byl zde můj záměr.

Zbylé dvě boční stěny jsem navrhl jako odnímatelné, protože bylo nutné zajistit přístup k sensorům, měřícím bodům, pojistkám, případně samotným článkům pro jejich výměnu. Zde jsem obložení uchytil na plastový metrážový suchý zip. Na něj není kladen žádný zvláštní mechanický nárok, obzvlášť když bude každý stack shora zasunut do velmi těsné šachty v kontejneru.

Články jsou uspořádány v poměru 6 článků na výšku a 22 na délku. Je tak dosažen optimální poměr mezi výškou těžiště a půdorysným rozměrem baterie, který byl omezený. Články jsou zasazeny do struktury patřičným směrem, který koresponduje se směrem toku proudu. Vždy 11 článků je orientováno směrem jedním a navazujících 11 článků směrem opačným. Tento způsob je výhodný zejména proto, že proudová trasa se nekříží a je téměř bezindukční. Propojovací plechy spojují vždy pouze sousední póly. Skutečnost, že počet článků v paralelní skupině je lichý, způsobila, že sestava článků a jejich propojení nejsou symetrické, ale články přebývají do další řady. Spojovat takovou konfiguraci článků je velmi nestandartní, natož pomocí standartních tvarů plechových pásků. Propojení jsem tedy navrhl laserem řezanými maticemi niklového plechu. Mají v každém směru odpovídající šířku a dokáží spojit až 4 řady článků. Tím jsem sledoval záměr minimalizovat přechodové odpory a částečně i zjednodušit výrobu. Na obrázku 3 – Spojovací plech, je příklad finální podoby spojovacího plechu. Jeho tvar do značné míry určila geometrie podpůrné struktury. Proudová cesta vede vodorovně a její šířka je největší, jaká se do podpůrné struktury s malými rezervami vešla. Propoje kolmé na proudovou cestu jsou užší, ale jsou zachovány, a to v zájmu balancování nesymetrií proudové cesty a mechanického ztužení celku.



Obrázek 3 – Spojovací plech (vlastní zpracování)

Bližší pozornost jsem věnoval volbě materiálu a konkrétní tloušťce plechu. Standardně se k propojování článků 18650 a jim podobných používá materiál zvaný hilumin. Byl to první materiál, který jsem zvažoval, je to ocel s povrchovou úpravou niklu. V této aplikaci ale používám proudy s několikanásobně vyššími proudy a průřez plechu, který by tento proud bezpečně převedl, by byl s článkem nesvařitelný a celková hmotnost by také byla neúnosná. Další materiál, který jsem zvážil, byla měď. Disponuje vysokou elektrickou vodivostí, nicméně, také by nebyla v adekvátní tloušťce navařitelná. Proto jsem se po konzultaci se specializovanou firmou zaměřil na čistý nikl, materiály pod označením Ni200, Ni201 a podobné. Orientačním výpočtem jsem si ověřil, že tento materiál dokáže při svařitelné tloušťce bezpečně převést potřebné proudy. K dispozici jsem měl dle aktuální nabídky kovohutí v ČR dvě konkrétní

tloušťky plechu, z nichž bylo možno plechy vyrobit: 0,2 mm a 0,45 mm. Varianta s tlustším plechem se z hlediska elektrického jevila jako mnohem vhodnější. Provedli jsme ve spolupráci s firmou testovací sérii, avšak plechové propoje nebylo možné k článkům spolehlivě přivařit. Byli jsme tedy nuceni použít plech tloušťky 0,2 mm. Jelikož jsem si nebyl jistý proudovou zatížitelností takového řešení, provedl jsem kontrolní výpočet s cílem zjistit proudovou hustotu ve vodiči, ohmické ztráty nejexponovanějších míst a úbytky napětí. Pro efektivní návrh jsem si vytvořil tabulku 4 – Návrh propojovacích plechů, integrující všechny použité obecně známé vztahy, poté manipuloval s proudem a sledoval změny výstupních parametrů. Z uvedených výsledků jsem nebyl spokojený především s proudovou hustotou, neboť při nominálním proudu značně přesahovala 10 A/mm^2 . Jelikož ale nebyl k dispozici jiný použitelný materiál, rozhodl jsem se použít plech tloušťky 0,2 mm, stacky vyrobit a provést kontrolní měření termokamerou pro detailní kontrolu zahřívání proudových cest. V případě nedostatečného průřezu jsme byli připraveni klíčové části proudové cesty zesílit přeplátováním. Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v další kapitole.

Nikl		
Rezistivita	6,93E-08	$\Omega \cdot \text{m}$
Tepelný odpor	90,9	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Počet spojů	6	ks
Šířka spoje	7,50E-03	m
Délka spoje	1,20E-02	m
Nominální proud	1,30E+02	A
Tloušťka plechu	2,00E-04	m
Výsledný průřez	9,00E-06	m^2
Proudová hustota	14,44	A/m^2
Výsledný odpor	9,24E-05	Ω
Výsledný výkon	1,56	W
Výkon na spoj	0,26	W
Koeficient	1,7	
Počet článků v sérii	72	ks
Ztráty ACP:	191,13	W
Úbytek na spoji	0,012	V
Úbytek celkový	1,470	V

Tabulka 4 – Návrh propojovacích plechů (vlastní zpracování)

Dalším problémem bylo vyvést proudovou cestu na přípojovací terminál a provedení a umístění tohoto terminálu. Již dříve jsem se rozhodl navrhnout základní strukturu se všemi články tak, aby všechny stacky byly záměnné, tudíž shodné. Z toho vyplynula nutnost, aby přípojovací terminály byly symetrické. Zároveň z konstrukce proudové cesty bylo zřejmé, že terminály musí ležet na protilehlých koncích. Vyplývala z toho nutnost zalomit proudovou cestu svisle vzhůru, což by při použití čistého niklového plechu bylo značně obtížné. Po mnoha úvahách jsem tuto situaci vyřešil prodloužením niklového plechu za roh na konec stacku, který jsem v každém průsečiku navařil na měděný pásek stoupající vzhůru k terminálu. Svaření jsem provedl metodou TIG bez přídavného materiálu. Pevnostní zkoušky vzorků prokázaly maximální spolehlivost tohoto spojení, vždy došlo k vytržení svaru z měděného pásku.

V návrhu přípojovacího terminálu mě limitoval hlavně vertikální prostor a konstrukce stacku. Měděný pásek vedoucí na povrch stacku jsem použil zároveň jako přípojovací terminál. Tloušťku pásku jsem zvolil 1 mm pro jeho snadnou dostupnost a šířka vyplynula z rozměrů styčné plochy terminálu, kterou jsem pro zajištění minimálních ztrát a pro mechanickou robustnost navrhl 20x20 mm. V každém rohu stacku jsem umístil roznášecí člen z FR4, který roznáší všechny vyvíjené síly na podpůrnou strukturu na každé straně. Do roznášecího členu jsem vlisoval a zalepil ocelový šroub M6 potřebné délky, ten jsem vsunul do díry na konci pásku, celou sestavu ohnul a vyrovnal do vodorovného směru a zalepil epoxidovou pryskyřicí. Tímto vzniknul přípojovací terminál nízké hmotnosti a vysoké robustnosti.

Navazujícím problémem k řešení bylo umístění ventilačních otvorů na povrchu stacku. Vzhledem k tomu, že je navržen pro umístění v šachtě vnější nosné struktury, jedinou možností bylo použít svrchní stěnu. Jak blíže vysvětlím dále, vzduch bude stackem proudit podél. Mým záměrem zde bylo, aby vzduch proudil pokud možno celým stackem. Ventilační otvory jsem tedy umístil v těsné blízkosti každého terminálu tak, aby byl kolem nich zajištěn potřebný manipulační prostor. Vzhledem k výsledné šířce stacku 71 mm jsem navrhl otvor pro ventilátor 70x70x10 mm, konkrétně jsem následně použil Sunon MB70101V1-000U-G99. Nad stackem byl k víku kontejneru k dispozici prostor 30 mm, takže při případném nedostatečném průtoku vzduchu zůstala rezerva pro výměnu axiálních ventilátorů za radiální, které dokážou při velkém odporu vzduchové cesty poskytnout větší průtok než ventilátory axiální. Půdorys ventilátoru zůstane stejný, pouze využije celý prostor až k víku kontejneru.

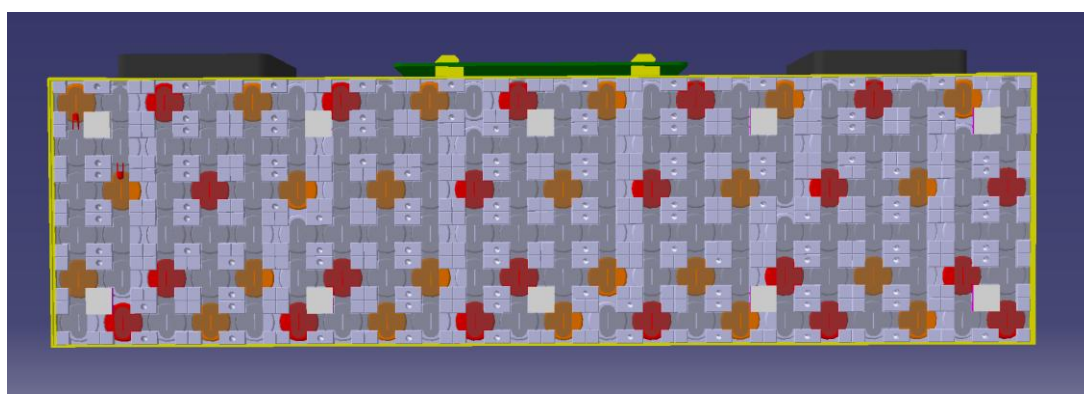
Na svrchní stěnu stacku jsem dále musel vměstnat přítlačné členy kontejneru, jejichž účel je držet stack v šachtě a zamezit jeho pohybu směrem vzhůru. Tyto členy byly dva na každý stack. Protože pro jejich správnou funkci nesměly být u sebe, umístil jsem je do zbývajících prostorů co nejdál od sebe, tedy v těsném sousedství každého z ventilátorů.

Do zbylého prostoru mezi přítlačné členy - tedy na samý prostředek stacku - jsem umístil modul systému AMS. Tato pozice byla výhodná hned z několika důvodů. Prvně jsou moduly snadno dosažitelné a vyměnitelné, vadná jednotka může být vyměněna bez nutnosti rozebírat proudovou cestu, přítlačné členy a vyjmát stack ze šachty, což je na závodech FS velmi ceněná časová úleva. Také je symetrické umístění modulu výhodné tím, že přicházející vodiče pro měření teplot a napětí článků se rovnoměrně sbíhají v prostředku stacku a nehromadí se například na kraji stacku, kde by se mohly mechanicky poškodit. Moduly AMS jsou spojeny s hlavní řídicí jednotkou pouze dvěma vodiči pro napájení ventilátorů a komunikační sběrnici isoSPI. Galvanické oddělení podle pravidel FS je realizováno v každém z modulů. Každý modul rovněž ovládá chod dvou ventilátorů. Využívá k tomu napájení z hlavní řídicí jednotky a sběrnici, po které dostává informaci o požadovaném výkonu. Jako bezpečnostní standart považuji, že při ztrátě komunikace s hlavní řídicí jednotkou baterie budou ventilátory vždy běžet na 100% výkon.

Dalším úkolem bylo navrhnout měřící vodiče tak, aby splňovaly výše citovaná pravidla. Jelikož je v každém stacku 12 paralelních skupin článků v sérii, bylo třeba použít 13 měřících vodičů. Místo „fusible link“ vodičů jsem raději použil pojistky s axiálními vývody, které jsou snadno dostupné a nahraditelné. Jedním koncem jsou připájeny na připravený výběžek každého spojovacího plechu a na její druhé straně pokračuje vodič až do modulu AMS, kde je na vstupu rovněž pojistka. Ta je dimenzována na 1 A a přehoří v případě, že dojde k problému na samotném modulu. Modul se vymění za funkční a baterie je připravena k jízdě. Pojistka na straně stacku jsem dimenzoval na 3 A, tak aby vydržela přetavení pojistky v modulu. Rovněž je dimenzován přívodní vodič o průřezu $0,25 \text{ mm}^2$. Při závadě na modulu tedy nebude nutné opravovat stack. K přetavení pojistky ve stacku dojde teprve při zkratu na trase měřícího vodiče k jinému potenciálu trakčního systému, například k sousednímu vodiči.

Nyní zbývalo vyřešit způsob měření teplot vybraných článků. V první řadě jsem se rozhodl měřit pouze minimum článků stanovené pravidlem EV3.6.6, tedy třetinu. Důrazné doporučení měřit teplotu všech článků považuji za zcela zbytečné. Jednak jsou

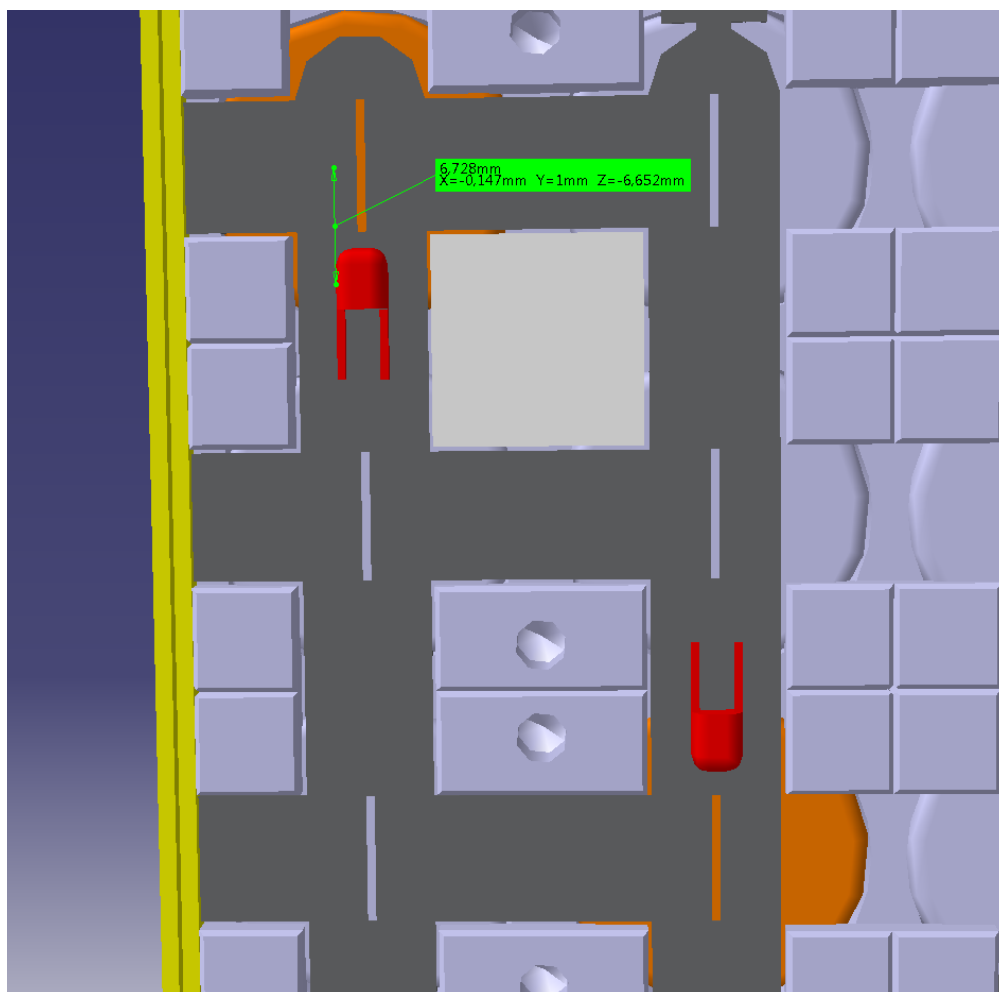
vybrané články mnohem bezpečnější než standardně používané prismatické články Li-pol, na která jsou navržena pravidla, mají vyšší tepelný limit, plášť z ocelového plechu a bezpečnostní ventil a pak technické řešení by bylo velmi komplikované, jelikož celkový počet článků v baterii je 792. Rozhodl jsem se měřit 44 článků, což je z použitých 132 článků na stack přesně třetina. Rozmístil jsem je rovnoměrně ve stacku, přičemž u dna stacku je měřeno článků více, protože zde bude chlazení vzduchem nejméně efektivní a předpokládám, že tato část stacku bude dosahovat nejvyšších teplot. Rozložení měřených článků je znázorněno na obrázku 5. Články zvýrazněné červeně jsou měřeny z jedné strany a články oranžové jsou měřeny ze strany druhé.



Obrázek 4 – Rozložení měřených článků (vlastní zpracování)

Jako tepelné senzory jsem zvolil termistory NTC AVX NB20L00223KBA, protože při požadovaných parametrech to byl nejlevnější dostupné řešení. Podotýkám, že celkový počet termistorů byl minimálně 308, jelikož celkově jsem navrhl postavit 7 stacků. Na termistory v pouzdru SMD jsem rozhodl naletovat měřicí vodiče a zaletovaný termistor uzavřít do smršťovací trubičky. Zvolil jsem vodič s teflonovou izolací s průřezem AWG30, protože to byl nejmenší vodič, který jsem byl schopný zakrimpovat do konektorů na moduly, a který dokázal splnit nároky na napětí a mechanickou odolnost. Vzniklé senzory byly připevněny na vybraná místa na niklovém plechu pomocí vysokoteplotního silikonového lepidla, protože při potřebné pevnosti poskytovalo tepelně odolný a zároveň pružný spoj. Senzory jsem umístil vždy na niklový plech mimo proudovou cestu v dostatečně malé vzdálenosti od pólu článku. Detail umístění zachycuje obrázek 6 – Detail umístění tepelných senzorů.

Poznámka: na detailu není použit finální návrh spojovacího plechu.



Obrázek 5 – Detail umístění tepelných senzorů (vlastní zpracování)

2.5.2 Prostorové uspořádání baterie

Posledním velkým dílčím úkolem při návrhu trakční baterie bylo navrhnout prostorové uspořádání baterie a rozmístění dílčích komponent s cílem maximálně využít prostorové dispozice a respektovat přitom vzájemné nároky a souvislosti komponent.

Trakční baterie je ve voze umístěna za pilotem, co nejbliž u země. Vyplývá to z obecných předpokladů pro návrh osobního automobilu. Záměr je, aby trakční baterie byla k pilotovi umístěna co nejbliž, tedy co nejbliž těžišti vozu, s cílem minimalizovat moment setrvačnosti vozu. Zároveň je zde záměr posunout co nejniž k zemi těžiště samotné.

Umístění trakční baterie ve voze ilustruje obrázek 6.

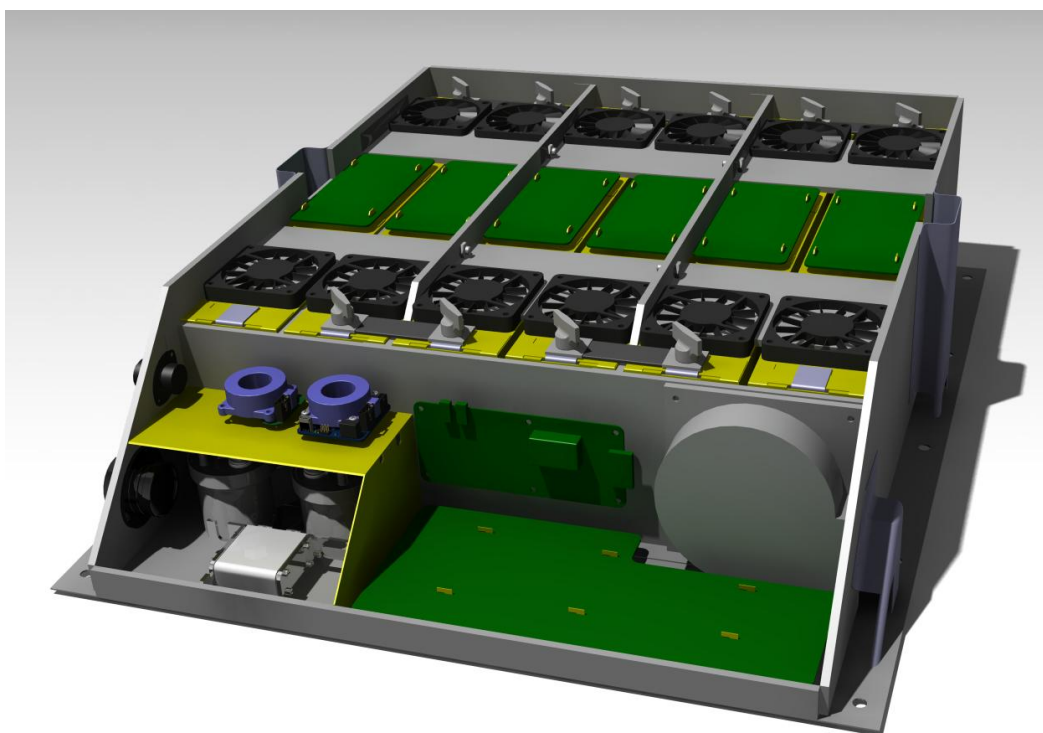


Obrázek 6 – Umístění trakční baterie ve voze (vlastní zpracování)

Pro baterii byl v konceptu vozu vyčleněn přibližný prostor a čekalo se na vyřešení prostorových dispozic baterie. Zásadní otázka byla, zdali využít trojúhelníkový prostor hned za bezpečnostní stěnou za pilotovými zády a začlenit jej do prostoru baterie. V minulých generacích vozu byl tento prostor využit pro jinou infrastrukturu a stěny baterie byly svislé. V této konstrukci jsem se ale nakonec rozhodl začlenit tento prostor do baterie, protože součástí baterie je vedle stacků i nemalé množství elektrické infrastruktury a tu jsem se do tohoto prostoru rozhodl zabudovat. Pokud bych tento prostor nevyužil, musel bych tuto infrastrukturu přesunout na vrchní stranu baterie a to by jednak zkomplikovalo celou konstrukci a přesunulo infrastrukturu na místo náchylnější k poškození, protože by se infrastruktura musela vyjmout vždy, když by bylo třeba vyjmout stacky. Toto řešení by také nepatrně přispělo ke zvýšení těžiště vozu. Jak se ukázalo v dalším postupu návrhu, toto rozhodnutí poskytlo elegantní řešení většiny problémů, které během dalšího návrhu vyvstaly. Vzniklý prostor pro jednoduchost označuji jako přední část baterie.

Největší komponenty, které bylo potřeba do přední části baterie vměstnat, byly hlavní řídicí jednotka se zabudovaným DC/DC zdrojem palubního napětí a skupina komponent sestávající ze dvojice izolačních relé baterie (AIRů) a hlavní pojistky, která musí být podle pravidel FS oddělena od článků nehořlavým a nevodivým materiálem. Rozhodl jsem se vestavět zmíněnou skupinu do pravé části prostoru (bráno po směru jízdy), a oddělit ji celou již použitým materiálem FR4. Pravou stranu jsem zvolil proto,

že do skupiny jsem rovnou zahrnul i výstupní HV konektor, a ten musel být napravo, protože trakční energie je po voze rozvedena po pravé straně. Situaci přibližuje obrázek 7 – Přední část baterie. Dělicí stěna je do kontejneru pevně vlepena a slouží jako konstrukční prvek. Svrchní a přední stěny jsou odnímatelné, ostatní nalepené na stěny a dno kontejneru. Výsledný celek, který jsem pracovně pojmenoval „AIR box“, je při minimální hmotnosti značně robustní. Zbývající část prostoru jsem vyčlenil pro využití ostatními jednotkami, zejména hlavní řídicí jednotkou, která zabírá většinu plochy v levé části kontejneru. Pro upevnění této jednotky jsem také použil výše popsany rychloupínací systém pomocí lyžin z kompozitního materiálu.



Obrázek 7 – Přední část baterie (vlastní zpracování)

S rozložením těchto hlavních komponent taktéž souvisí trasa chladicího vzduchu, kterou jsem musel také do návrhu zakomponovat. Trasu jsem navrhl tak, aby se vzduch dostal nejprve ke stackům, protože mají při chlazení největší prioritu. Vzduch je tedy nasáván na obou bocích a v zadní části baterie a nasávací otvory jsou opatřeny kryty na způsob sifonu, takže jsou odolné i proti stříkající vodě. Nasátý vzduch se poté paralelně rozdělí a je vháněn do každého ze šesti stacků, kterými proudí směrem dopředu. Na vstupním i výstupním otvoru stacku je umístěn axiální ventilátor, jak je blíže specifikováno v popisu konstrukce stacku. Ohřátý vzduch, který vyjde ze stacků,

přepadá přes hranu do přední části baterie, kde chladí DC/DC zdroj a hlavní řídicí jednotku a poté vychází z baterie poháněn radiálním ventilátorem na levé straně. Zvolil jsem největší ventilátor, který se do prostoru vešel, konkrétně Sunon PMB2412PLB2-A.(2).GN. Hlavní řídicí jednotka a DC/DC zdroj palubního napětí resp. jejich kritické části jsou chlazeny aktivně a dokáží, jak jsme otestovali, spolehlivě pracovat i při teplotách do 80 °C, takže mohou být takto trvale provozovány.

V přední části baterie je umístěno ještě několik dalších komponent, které tvoří nedílnou součást baterie. V první řadě je to modul IMD (Isolation Monitoring Device), což je jednotka, která monitoruje izolační stavy trakčního systému a v případě zjištění závady na izolaci vůči zemi vozu, neprodleně odpojí pomocí AIRů baterii od zbytku vozu a vyhlásí chybu hlavní řídicí jednotce baterie. Ta postoupí informaci přední řídicí jednotce vozu a ta zareaguje rozsvícením kontrolky v kokpitu. Tento modul je spojený s hlavní řídicí jednotkou a umístil jsem ho na svislou stěnu nad DC/DC měnič. Díky této poloze je u této jednotky velmi blízko a zároveň je možno obě jednotky vyjmát nezávisle na sobě.

Další dvě jednotky, které zaujímají místo v přední části baterie, jsou proudové senzory. Umístil jsem je na svrchní stěnu AIR boxu, do které jsou přišroubovány pomocí plastových šroubků M3, a trakční vodiče procházejí přímo touto stěnou vzhůru směrem ke stackům. Svrchní stěnu, kterou jsem původně zamýšlel umístit výše, jsem pro tento účel snížil až na bezpečné minimum, což je výška AIRů a malá rezerva. Takto jsem elegantně využil zbylý prostor nad AIR boxem a vytvořil bezpečný kanál, kudy jsem poté natrasoval hlavní svazek ke GLV konektoru, jak upřesním dále.

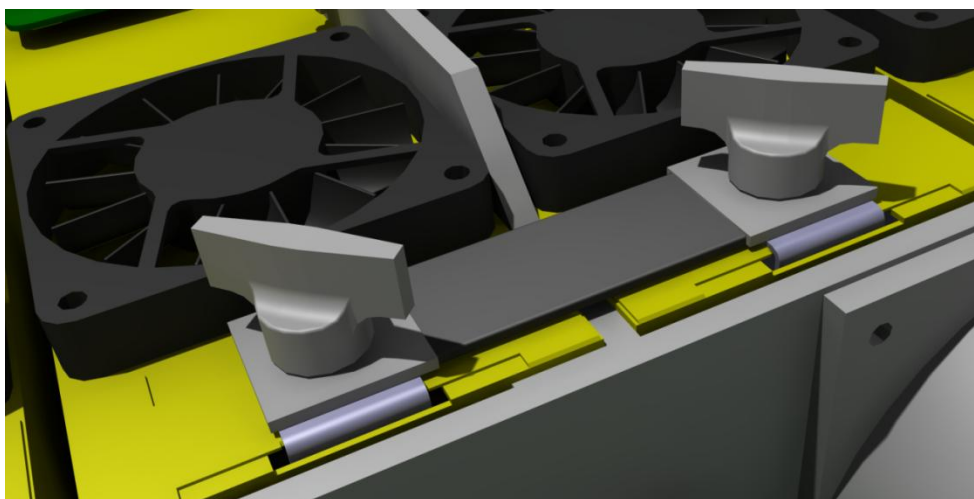
Poslední věcí, které jsem v baterii našel místo, byla červená indikační LED dioda, která musí podle pravidla FS EV3.3.9 umístěna na povrchu kontejneru. Umístil jsem ji do zadního nádechu ventilace na pravé straně baterie, protože je to jediné místo, odkud je indikátor dobře vidět, a zároveň nepředstavuje instalační otvor hrozbu narušení vodotěsnosti, jelikož je umístěn v sifonu na vnější straně kontejneru. Tento indikátor je tak triviální komponenta, že v celkovém modelu není zanesena.

2.5.3 Trakční proudová cesta a trasy vodičů

Zvláštní pozornost věnuji trakční proudové cestě, při jejím popisu začnu u stacků a budu pokračovat po směru toku energie směrem ven z baterie. Jak jsem zmínil výše, proudová cesta je na konci stacků zakončena přípojovacími terminály, které sestávají z kontaktní plochy a upevňovacího šroubu. Při konstrukci těchto terminálů jsem se

musel vypořádat s požadavkem na servisní konektory, jak jsem zmiňoval výše. Veškeré kladené nároky jsem v návrhu vyřešil konstrukcí, kterou popíši v následujících větách.

Detail propojení dvou stacků a konstrukci servisních konektorů přibližuje obrázek 8 – Detail propojení stacků. Konstrukci konektoru na straně stacku tvoří kontaktní plocha o rozměrech 20x20 mm z měděného pásku, který zároveň přivádí proud z nitra stacku. Uprostřed plochy je umístěn ocelový šroub velikosti M6, který směřuje vzhůru a slouží k upevnění vnějších částí konektoru. K propojení kontaktních ploch sousedních stacků slouží izolovaný mezikus z totožného měděného pásku, který se nasune na terminály shora. Tento propojovací mezikus je poté zajištěn na obou stranách sestavou podložky a matice. Matice je použita samosvorná a je vlisována do plastového pouzdra, které plní funkci madla pro utažení a povolení a poskytuje elektrickou izolaci. Pod maticí je vždy vložena plastová izolační krytka, která je uložena v jedné výšce s podložkou. Podložka je ale tlustší, a tak přenáší veškerý tlak, aniž by se krytka deformovala. Obě plastové součásti jsou tisknuté na 3D tiskárně z materiálu ABS ve dvou barvách, červenou na kladném pólu stacku a černou na záporném. Propojovací měděný pásek je izolován smršťovací trubicí systému Raychem ATUM 4:1, která má dobrou mechanickou odolnost a díky vnitřní vrstvě lepidla bude na pásku pevně držet.



Obrázek 8 – Detail propojení stacků (vlastní zpracování)

Nejdříve jsem zvažoval, zda do stacku zabudovat matici a do plastového kusu šroub, ale toto řešení jsem shledal jako nepoužitelné, protože vyžaduje hlubší zástavbu do stacku. Šroub by potřeboval ve stacku prostor, který v současném stacku není. Přímě pod obložením z FR4 jsou uloženy články. Samosvorné matice se pro správnou funkci musí měnit a to by touto konstrukcí bylo téměř znemožněno. Proto jsem se rozhodl do

stacku napevno zapustit ocelový šroub, který neproniká bezpečnostním obložení a terminál je jen tak vysoký, jako je hlava šroubu. Terminály jsem navrhl také tak, aby za ně mohl stack být vytažen z šachty. Navrhl jsem k tomuto účelu jednoduchá madla, která jsou určena k našroubování na šroub. Veškeré vyvíjené síly na šroub jsou přenášeny roznášecím členem na podpůrnou strukturu stacku.

Na krajní terminály jsou přítlačnou maticí připojeny vodiče zakončené standartními krimpovacími oky, a vodiče vedou z obou konců stacků do AIR boxu. Kladný vodič je velmi krátký a vede přímo dolů, vodič záporný je veden po hraně v horním prostoru přední části baterie. Každý vodič prochází při vstupu do AIR boxu jedním proudovým senzorem. Záporný vodič je veden na jeden z AIRů a na jeho druhé straně pokračuje přímo do výstupního trakčního konektoru. Kladný vodič je veden nejdříve na hlavní trakční pojistku a teprve poté na druhý AIR a do výstupního konektoru. Jako přívodní vodiče do AIR boxu jsou použity vodiče Lappkabel ÖLFLEX® FD 90 o průřezu 16 mm^2 s teplotní odolností do předepsaných $90 \text{ }^\circ\text{C}$. V AIR boxu je použit flexibilní vodič Raychem TR 16-6-0, s průřezem 6 mm^2 . Na každou trasu jsem použil dva tyto vodiče paralelně, zejména z důvodu snazší montáže, protože jsem tím výrazně zmenšil poloměry ohybů tras. Výstupní trakční konektor také obsahoval 4 výkonové piny, které byly určeny pro zalisování vodiče o maximálním průřezu 8 mm^2 . Použitím vodiče Raychem TR 16-6-0 a zdvojením tras jsem tuto situaci elegantně vyřešil.

Do pravé stěny nad výstupní trakční konektor jsem umístil GLV konektor, jehož účel je propojit palubní systémy baterie se zbytkem vozu. Jeho umístění je dobře vidět na výše uvedeném obrázku 7 – Přední část baterie. Umístil jsem jej na stejnou stranu jako konektor trakční se záměrem využít zbývající prostor nad AIR boxem vedle proudových senzorů. Tento prostor k tomu byl více než vhodný, zatímco na druhé straně zabíral většinu využitelné plochy radiální ventilátor. Svazek vedoucí od konektoru jsem pak bezpečně uložil na AIR box před proudovými senzory a uchytil pomocí nalepovacích příchytek. Svazek spojuje především GLV konektor a hlavní řídicí jednotku, ale odbočky vedoucí k dalším jednotkám se oddělují po jeho trase, takže je trasa svazku optimálně využita.

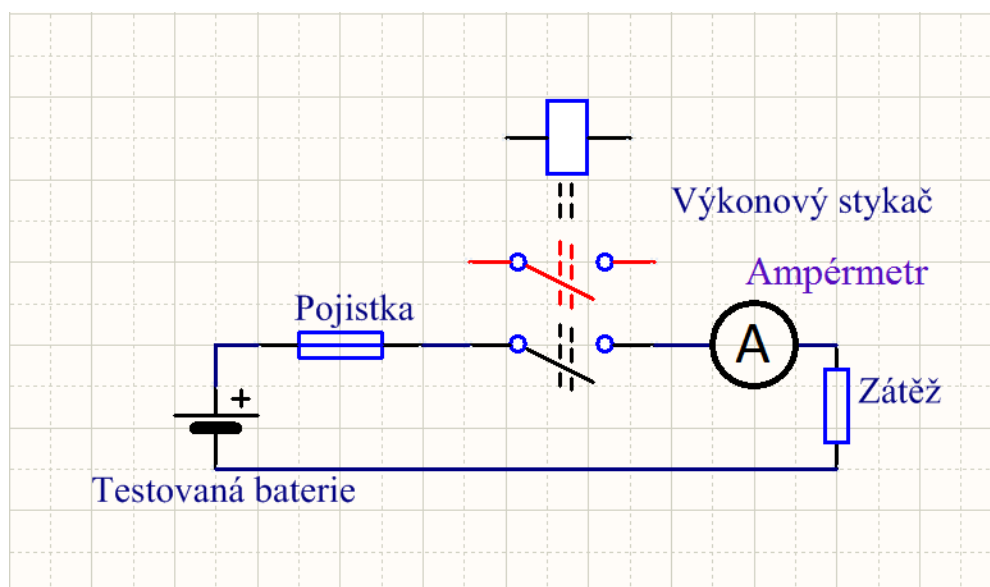
3. Testování parametrů navržené a vyrobené baterie

Na vyrobené baterii jsem provedl několik testů s cílem ověřit její parametry a získat zpětnou vazbu na její návrh. Byl to test zahřívání propojovacích plechů, poté jsem měřil vybíjecí charakteristiky napětí při konstantní zátěži a nakonec sériový odpor baterie.

3.1 Oteplení akumulátorové baterie

První test, který jsem po sestavení stacků provedl, byl test termokamerou při konstantní zátěži. Účel tohoto měření bylo zjistit oteplení propojovacích plechů a také prověřit, jestli jsou všechny bodové svary řádně provedeny a nedochází někde k bodovému přehřívání vlivem přechodového odporu. Měřením prošel každý ze sedmi vyrobených stacků.

Měření jsem prováděl na jednoduché sestavě skládající se z pojistky P50T06 160A, výkonového stykače, výkonové rezistorové matice a klešťového ampérmetru, vše zapojené v sérii, viz. obrázek 9 – Schéma testovacího přípravku.

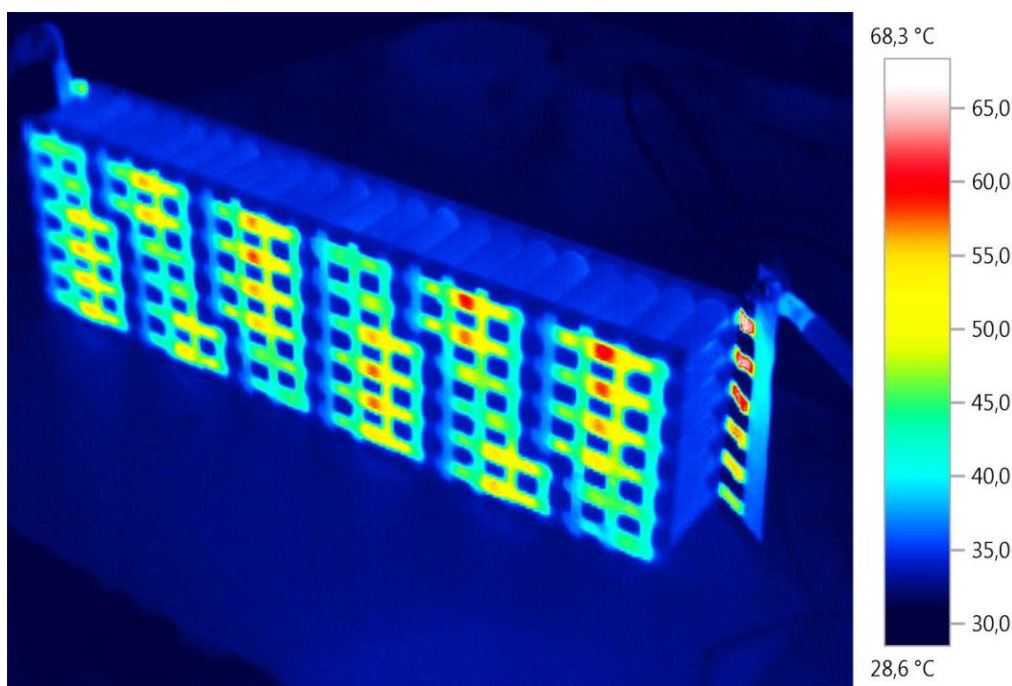


Obrázek 9 – Schéma testovacího přípravku (vlastní zpracování)

Stykač jsem spínal tlačítkem z regulovatelného zdroje. Vhodným sérioparalelním zapojením rezistorové matice jsem nastavil vybíjecí proud cca. 300 A. Tento proud, který je více jak dvakrát vyšší než proud nominální, jsem zvolil proto, aby oteplení bylo

co nejrychlejší a vytvořené teplo se nestihlo akumulovat do tepelné kapacity článků. Tímto způsobem jsem se snažil dosáhnout maximálního kontrastu. Nejprve jsem měřený stack zatížil dvěma sekundovými pulzy a kolega pořídil snímek z každé strany stacku. Snímek byl pořízen vždy okamžitě po rozeptnutí stykače. Po vyhodnocení této první sekvence jsem měření opakoval a dobu zatížení prodloužil na 3 sekundy. Reálné zatížení ve voze přitom této hodnoty bude dosahovat maximálně jednu sekundu. Provedeným měřením jsem tedy stacky vystavil zatížení třikrát většímu, než v reálném provozu.

Během výroby byl posvařován nejdříve stack první a před sestavením dalších stacků jsem nejdříve provedl měření na tomto stacku, abychom při výrobě zbývajících stacků mohli rovnou provést případné korekce. Výsledky měření ukázaly, že niklové plechy se více zahřívají v místech, kde prochází proudová trasa přes šest vodorovných spojů, a značně také v místě mezi posledními články a měděným páskem. Termogram přikládám v obrázku 10 – Test zahřívání proudové cesty.



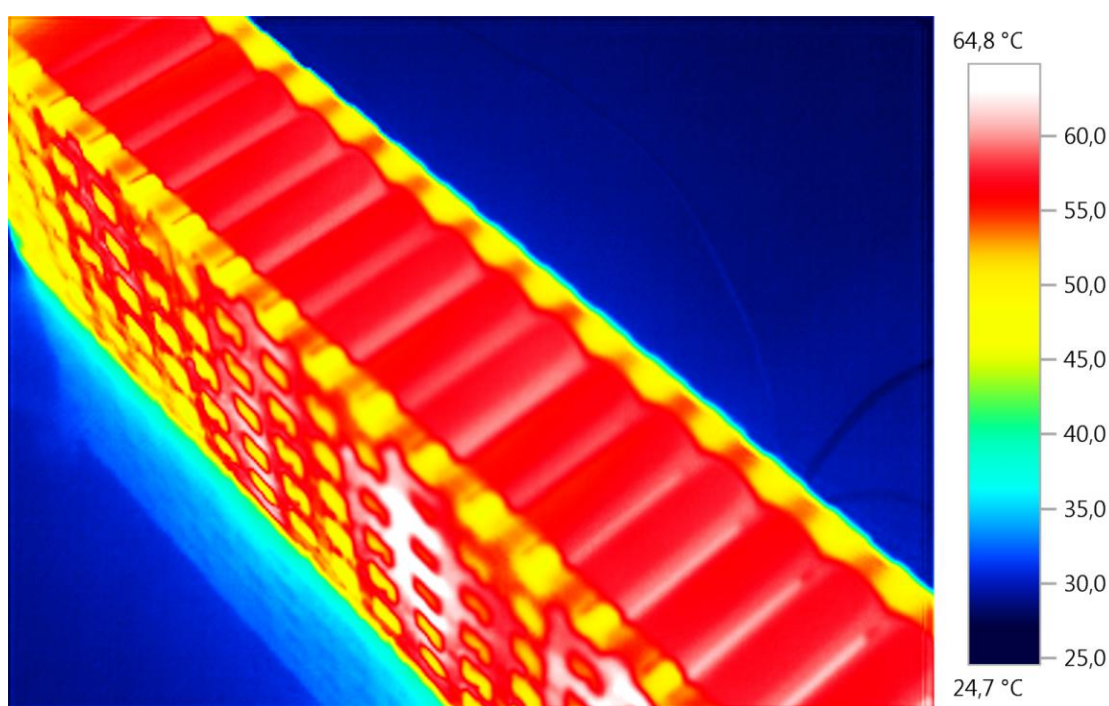
Obrázek 10 – Test zahřívání proudové cesty (vlastní zpracování)

Navrhl jsem posílení těchto míst přeplátováním niklovými plíšky o tloušťce 0,13 mm a v místě napojení na měděný pásek použít nadbytečné propojovací plechy, které jsem pro tento účel upravil. Navržená úprava posílila proudovou cestu na stacku o polovinu a na jeho koncích na dvojnásobek. Úpravu jsme ve spolupráci se specializovanou firmou

realizovali a poté jsem provedl druhé kontrolní měření. Jeho výsledky ukázaly, že proudová cesta se zahřívá rovnoměrně a již nedochází k jejímu lokálnímu přehřívání. Poté jsem s prvním stackem provedl druhé měření, kdy jsem simuloval průběh vytrvalostního závodu s počátečním proudem 120 A, který byl předpokládáný střední proud během závodu. Cíl tohoto testu bylo zjistit, poměr mezi zahříváním článků a propojovacích plechů. Termogram spolu se skutečným snímkem stacku, které byly pořízeny několik sekund před koncem tohoto testu, je na obrázku 11 – Oteplení prvního vyrobeného stacku.

Poznámka: Stack byl pro účely testu začerněn, aby bylo měření relevantní a bylo zamezeno odrazům infračerveného záření na povrchu propojovacích plechů.

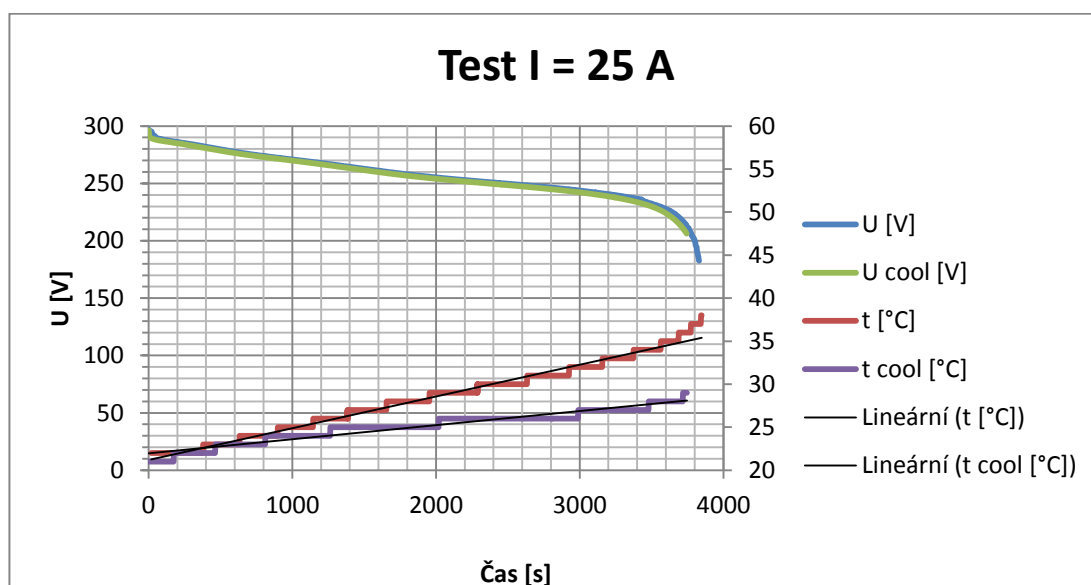
Na snímku je vidět, že články dosahují vyšší teploty, než plechy samotné, a nikde nedochází k lokálnímu přehřátí. Teplota propojovacích plechů se během testu pohybovala v hodnotách kolem 60 °C a na žádném místě nepřesáhla 65 °C, což je stále ještě o 15 °C méně, než je maximální dovolená teplota článků. Závěrem měření jsem tedy konstatoval, že zjištěná míra zahřívání je únosná, obsahuje dostatečnou rezervu a není žádným způsobem nebezpečná pro provoz. Navrženou úpravu jsme následně aplikovali na všechny další stacky a u všech jsem provedl kontrolní měření proudem 300 A popsané výše. Všechny tyto stacky tímto měřením prošly bez zjištění žádné závady.



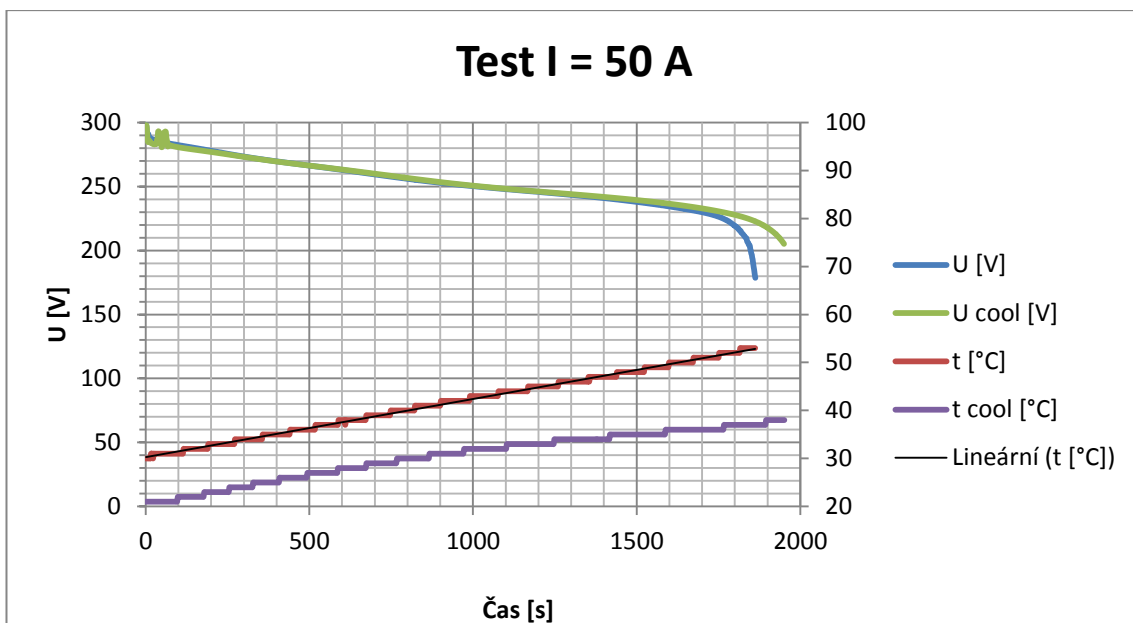
Obrázek 11 – Oteplení prvního vyrobeného stacku (vlastní zpracování)

3.2 Vybíjecí charakteristiky a sériový odpor

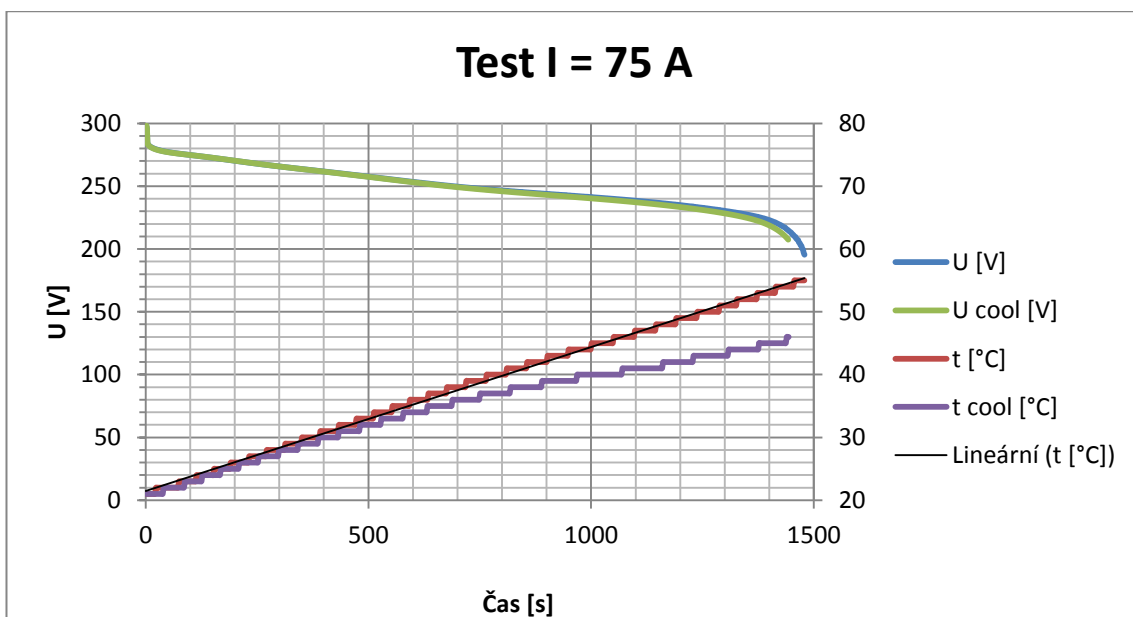
Další série testů byla zaměřena na zjištění vybíjecích charakteristik během vybíjení na konstantní zátěži, zjištění oteplení stacků a vliv chlazení na jeho průběh. Pro tento účel jsem navrhl provést celkem 8 testů při 4 různých úrovních zatížení. Pro každou úroveň zatížení byly provedeny dva testy, jeden s aktivním chlazením a druhý bez chlazení. Nejprve jsem navrhl použít zátěžné proudy 25 A, 50 A, 75 A, 100 A. V průběhu testování jsem však názor změnil a poslední test posunul nad hranici středního proudu při závodu Endurance, a to na 150 A. Uváděné hodnoty proudu jsou hodnoty počáteční, s poklesem napětí baterie během vybíjení proud pochopitelně klesá, protože zátěž tvoří prostý rezistor. Pro testy jsem použil aparaturu sestávající ze stejných komponent, jako při výše popsaném testování proudové cesty stacků s tím rozdílem, že pro testy proudy 25 A a 50 A jsem jako zátěž použil nastavitelnou rezistorovou kaskádu 25 kW, která poskytovala citlivější rozsah. K měření teplot a napětí jsem použil přímo moduly AMS, které měří napětí každé paralelní skupiny s rozlišením desetiny milivoltu a teplotu pomocí 264 senzorů s přesností jednoho stupně Celsia. Vybíjecí charakteristiku jsem vytvořil pomocí hodnoty celkového napětí, které vzniká sečtením hodnot všech paralelních skupin článků, a pomocí mediánu všech změřených teplot. Výsledné charakteristiky jsou uvedeny v grafech níže.



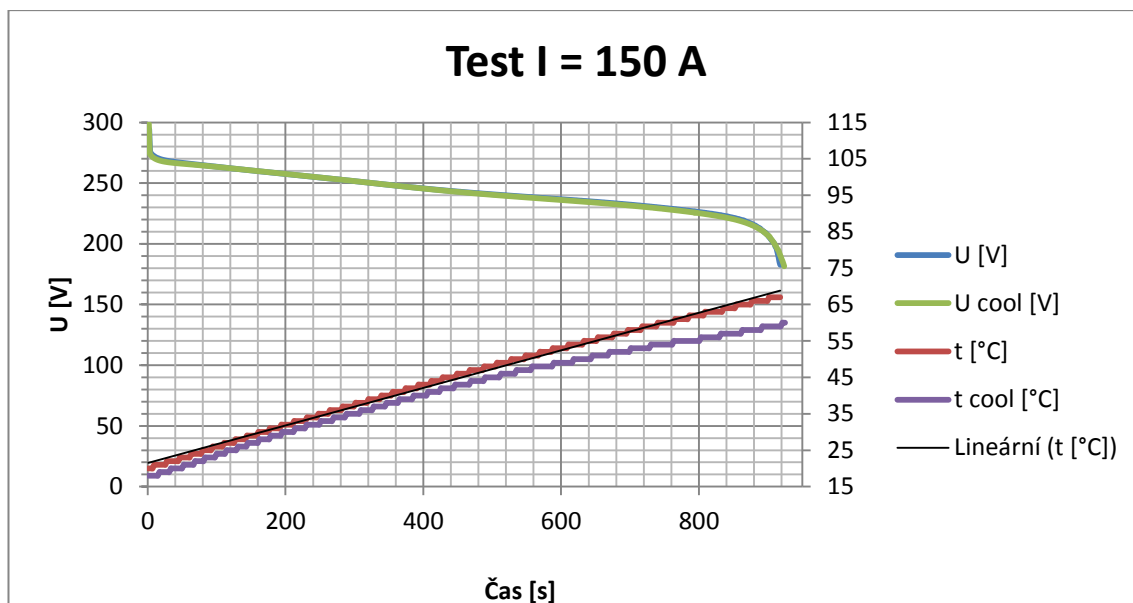
Graf 1 – Test I = 25 A (vlastní zpracování)



Graf 2 – Test I = 50 A (vlastní zpracování)



Graf 3 – Test I = 75 A (vlastní zpracování)



Graf 4 – Test I = 150 A (vlastní zpracování)

Uvedené vybíjecí charakteristiky obsahují data vždy ze dvou testů při stejném zatížení, jeden s aktivním chlazením a druhý bez chlazení. Data, která se vztahují k testům s aktivním chlazením, jsem označil slovem „cool“. Z naměřených výsledků je patrné, že aktivní chlazení odvádí malou část generovaného tepla a tato část je tím menší, čím vyšší vybíjecí proud byl použit. Převážná část tepla se podle očekávání akumuluje v tepelné kapacitě článků a přispívá ke zvyšování jejich teploty během vybíjení. Na druhou stranu je patrné především na posledním testu, že s rostoucí teplotou účinnost chlazení stoupá. Tento jev je zapříčiněn vzrůstajícím rozdílem teplot článků a chladícího vzduchu a při návrhu jsem ho předpokládal. U série testů s chlazením je patrné ukončení testů na vyšším napětí baterie než při testech bez chlazení. Je to způsobeno vyšší mírou rozbalancování článků, protože testy s chlazením jsem prováděl po testech bez chlazení a neměl jsem možnost baterii mezitím dobalancovat. Vybíjecí proces jsem ukončoval manuálně rozepnutím stykače vždy, když napětí nejvíce vybité paralelní skupiny dosáhlo 2,5 V.

Z naměřených dat jsem rovněž orientačně vypočítal sériový odpor baterie. Na začátku každého vybíjecího cyklu je patrný skokový pokles napětí. Tento pokles je tím větší, čím vyšší je zátěžný proud. Sériový odpor je možné z těchto dvou údajů o napětí a proudu spočítat pomocí základního vztahu elektrotechniky – Ohmova zákona:

$$R = \frac{U}{I}$$

Přesnost výpočtu nejvíce závisela na odečtení samotného napět'ového skoku, jelikož jeho krajní hodnoty nejsou pevně ohraničené. Vypočítal jsem tedy hodnotu sériového odporu pro každou úroveň zátěže.

$$R_{s25} = \frac{U_{25}}{I_{25}} = \frac{4}{27,5} = 0,145 \Omega$$

$$R_{s50} = \frac{U_{50}}{I_{50}} = \frac{9}{60} = 0,150 \Omega$$

$$R_{s75} = \frac{U_{75}}{I_{75}} = \frac{11}{75} = 0,147 \Omega$$

$$R_{s150} = \frac{U_{150}}{I_{150}} = \frac{23}{158} = 0,146 \Omega$$

Je zjevné, že výsledné hodnoty se zdají být změřeny s velkou přesností, nicméně s ohledem na přesnost měření proudu a odečítání napět'ového skoku uvažuji raději přesnost menší a jako výslednou hodnotu považuji sériový odpor $R_s = 0,15 \Omega$ s tolerancí $\pm 0,04 \Omega$.

3.3 Hmotnost a hustota energie

Posledním parametrem, který jsem chtěl zjistit, byla hustota energie vyrobené baterie v poměru k její hmotnosti. K tomu jsem použil přesnou hmotnost celé baterie a typickou energii, která činí 7,41 kWh. Ke zjištění hmotnosti baterie jsem nejdříve zvážil všechny jeho části a jednotlivé hodnoty následně sečetl, protože takto jsem se dopracoval k výsledku s největší přesností. K vážení komponent jsem použil kuchyňskou váhu s rozsahem 5 Kg a přesností na 10 g. Naměřené hodnoty a jejich počet v baterii jsem spolu s výslednou sumou shrnul do tabulky 5 – Hmotnost baterie

Položka	Hmotnost [Kg]
Kontejner baterie	2,20
Stacky	38,71
Hlavní řídicí jednotka	0,67
Moduly AMS	2,58
Izolační stykače	0,85
Vodiče a ventilátory	0,95
Suma	45,96

Tabulka 5 – Hmotnost baterie (vlastní zpracování)

Výše uvedenou sumou jsem získal hodnotu 45,96 Kg, kterou jsem zaokrouhlil na 46 Kg. Touto hmotností jsem podělil typickou energií baterie a výsledek zaokrouhlil na desítky směrem dolů:

$$\text{Hustota energie} = \frac{m}{Et} = \text{cca } 160 \text{ Wh/Kg}$$

Výsledná hustota energie zkonstruované baterie tedy dosáhla hodnoty 160 Wh/Kg. Touto hodnotou jsem velmi nadšený, protože dosažená hustota energie celé baterie je stále větší, než hustota energie všech samotných článků Kokam, které jsem původně zvažoval použít, a které byly použity v baterii minulé generace vozu.

V porovnání s minulou generací baterie došlo také ke zmenšení hmotnosti z cca 85 Kg na 46 Kg, tedy téměř na polovinu, přičemž došlo k zmenšení kapacity typicky z 8,8 kWh na 7,4 kWh.

4. Test baterie na reálném vozidle

Vyrobená a otestovaná baterie byla nasazena do vyrobeného vozu FSE_04x v průběhu celé závodní sezony roku 2015. Protože se však nepodařilo včas připravit datalogging všech údajů ze sběrnice CAN, nemám k dispozici žádné vybíjecí charakteristiky ze závodů. Pokusím se tedy zhodnotit všechny ostatní poznatky a zjištění a pojmu tuto poslední kapitolu jako zpětnou vazbu především pro elektromechanický návrh.

Během závodní sezony se baterie chovala v klíčových parametrech spolehlivě. Přesto však existují aspekty návrhu, které nebyly navrženy ideálně a musely být doladěny během testování, a které mohou sloužit jako vodítko ke zlepšení baterie v následující generaci.

Mezi hlavními zaznamenanými nedostatky byl relativně malý výkon vzduchového chlazení stacků. Neposkytoval dostatečnou jistotu, že nedojde k přehřátí baterie při vyšších okolních teplotách. Během závodů v Itálii dosahovaly teploty okolního vzduchu až 30 °C a při této teplotě jsem očekával, že teplota vystoupá přibližně 5 °C pod povolenou mez. Částečně se podařilo tento problém vyřešit nahrazením axiálních ventilátorů na výstupu každého stacku ventilátory radiálními, které poskytují větší tah. Tento problém bylo možné také vyřešit podchlazením baterie před závodem na teplotu nižší, než je teplota okolního vzduchu. Protože jsme však byli před závodem v časové tísní a přípravek pro podchlazení jsem nestihl připravit, problém byl vnímán jako zásadní. Faktem ale zůstává, že za celou dobu provozu baterie se nestalo, aby teplota baterie dosáhla své maximální meze dříve, než došlo k jejímu úplnému vybití. Ačkoli zastávám názor, že oteplení baterie netvoří pro její provoz žádné podstatné omezení, vnímám jako vhodné v další generaci chladicí výkon baterie navýšit a opatřit jistou rezervou, protože tím dojde ke snížení nároků na obsluhu.

Další nedostatek funkce baterie, který jsem zaznamenal, byla nespolehlivost údajů z tepelných senzorů. Byla způsobena tím, že piny v konektorech na rozhraní vodič / modul AMS byly zakrmpovány špatným způsobem a často ztrácely kontakt. Přestože jsem neměl k dispozici originální krimpovací nářadí, závadu jsem posléze opravil a spolehlivost výrazně zvýšil. Přesto si však myslím, že použité množství vodičů a krimpovaných spojů je samo o sobě bezpečnostní riziko a v příští generaci by mohlo být měření článků realizováno jiným, spolehlivějším způsobem, například pomocí flexibilního plošného spoje a plochého konektoru pro povrchovou montáž.

Vyjma výše uvedených nedostatků ale považuji elektromechanický návrh stacků a návrh prostorového uspořádání baterie za celkově vydařený. Navzdory své nízké hmotnosti jsou stacky dostatečně robustní a nikdy nedošlo k selhání jejich konstrukce. Během údržby jsem oceňoval oddělení přídatných komponent do přední části baterie, protože už nevytvářela potřeba tyto komponenty vyjímat pro účel vyjmutí stacků. Nikdy jsem taky nezaznamenal problém s vniknutím vody do baterie. Nasávací sifony tedy byly navrženy podle mého názoru adekvátně.

Vůz FSE_04x se na trati chová celkově velmi obratně a to i za nemalého přispění nízké hmotnosti a těžiště trakční baterie.

Volba článku VTC-5 byla podle mého názoru správná. S časovým odstupem jsem se dosud nesetkal s článkem lepších parametrů. Co se týče bezpečnosti, žádný z použitých 792 článků se dosud neodpojil z paralelní skupiny, což svědčí o velmi dobré vnitřní bezpečnostní úrovni těchto článků. V průběhu závodní sezony jsem se také nesetkal s týmem, jehož baterie by disponovala větší hustotou energie než baterie naše.

Závěr

Moje práce sestává ze čtyř hlavních částí. V první části se zabývám rešerší sekundárních článků vhodných pro stavbu trakční baterie a předkládám své argumenty pro finální výběr. Ve druhé části prezentuji svůj elektromechanický návrh stacků a vnitřního uspořádání baterie s použitím vybraného článku. Ve třetí části testuji parametry navržené a vyrobené baterie a optimalizuji některé nedostatky. V poslední části hodnotím kvalitu návrhu na základě zkušeností nasbíraných v průběhu závodní sezony a diskutuji problémy, se kterými jsme se setkali.

Zvolený článek Sony VTC-5 byl podle mého názoru nejlepší článek, jaký jsem mohl zvolit. Vysoká hustota energie, dostatečná proudová zatížitelnost a vysoká úroveň bezpečnosti z něj dělají článek, který i s odstupem času stále považuji za nejlepší pro danou aplikaci.

Použitý elektromechanický návrh stacků a návrh prostorového uspořádání baterie považuji za celkově vydařený. Základní konstrukce stacku je při své nízké hmotnosti dostatečně robustní a prostorové uspořádání funkční a ergonomické. Dle mého názoru může tento návrh jen s malými úpravami sloužit jako vzor pro baterii další generace.

Baterii jsem otestoval sérií vybíjecích testů při čtyřech různých vybíjecích proudech. Mezi hlavní závěry tohoto testu řadím uspokojivou míru oteplení baterie v závislosti na zatížení a velmi vysokou hmotnostní hustotu energie celé baterie, která činí 160 Wh/Kg. Tato hodnota je vyšší, než hustota energie samotných článků, které byly použity ke stavbě baterie minulé generace, což hodnotím jako velký úspěch.

V průběhu závodní sezony jsem se setkal s několika problémy na trakční baterii, které se mi ale podařilo vyřešit. Nesetkal jsem se dosud s žádným týmem mezinárodní soutěže Formula Student, který by disponoval trakční baterií o větší hustotě energie, než má baterie naše.

Seznam použitých zdrojů

1. *Battery University* [online]. Vancouver [cit. 2016-01-12]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
2. *FSAE Online: 2015 Formula SAE® Rules revision 91714 kz* [online]. 2015 [cit. 2016-01-12]. Dostupné z: <http://www.fsaeonline.com/content/2015-16%20FSAE%20Rules%20revision%2091714%20kz.pdf>
3. *PowerStream: Introduction of INR18650-25R* [online]. [cit. 2016-01-12]. Dostupné z: <https://www.powerstream.com/p/INR18650-25R-datasheet.pdf>
4. BERKA, Štěpán. *Elektrotechnická schémata a zapojení 2*. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-254-1.

Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obrázky

Obrázek 1 – Circuit interrupt device

Obrázek 2 – Stack

Obrázek 3 – Spojovací plech

Obrázek 4 – Rozložení měřených článků

Obrázek 5 – Detail umístění tepelných senzorů

Obrázek 6 – Umístění trakční baterie ve voze

Obrázek 7 – Přední část baterie

Obrázek 8 – Detail propojení stacků

Obrázek 9 – Schéma testovacího přípravku

Obrázek 10 – Test zahřívání proudové cesty

Obrázek 11 – Oteplení prvního vyrobeného stacku

Tabulky

Tabulka 1 – Klíčové parametry článků

Tabulka 2 – Přehled možných konfigurací

Tabulka 3 – Rozměry článků

Tabulka 4 – Návrh propojovacích plechů

Tabulka 5 – Hmotnost baterie

Grafy

Graf 1 – Test $I = 25 \text{ A}$

Graf 2 – Test $I = 50 \text{ A}$

Graf 3 – Test $I = 75 \text{ A}$

Graf 4 – Test $I = 150 \text{ A}$

Seznam příloh

Příloha 1 Datasheet článků Kokam

Příloha 1 Datasheet článků Kokam

TREMONDI s.r.o.
Kokam direct distributor CZ / SK



Kokam SPLB compact cells - technical data

series	model	capacity	maximum dimensions			maximum impedance	weight	discharge C-rate		discharge current		energy density
			width	length	thickness			contin.	peak	continuous	peak	
High Energy Density cells												
64	SLPB 35.64.95	2,1 Ah	64,5 mm	95,5 mm	3,7 mm	22,0 mΩ	44 g	2 C	3 C	4,2 A	6,3 A	177 Wh/kg
64	SLPB 52.64.95	3,3 Ah	64,5 mm	95,5 mm	5,4 mm	15,0 mΩ	67 g	2 C	3 C	6,6 A	9,9 A	182 Wh/kg
64	SLPB 62.64.95	4,0 Ah	64,5 mm	95,5 mm	6,4 mm	12,0 mΩ	82 g	2 C	3 C	8,0 A	12,0 A	180 Wh/kg
64	SLPB 77.64.95	5,3 Ah	64,5 mm	95,5 mm	7,8 mm	8,0 mΩ	102 g	2 C	3 C	10,6 A	15,9 A	192 Wh/kg
106	SLPB 50.106.100	5,0 Ah	107,0 mm	102,0 mm	5,9 mm	5,0 mΩ	140 g	5 C	8 C	25,0 A	40,0 A	132 Wh/kg
106	SLPB 68.106.100	8,0 Ah	107,0 mm	102,0 mm	7,3 mm	4,5 mΩ	160 g	2 C	3 C	16,0 A	24,0 A	185 Wh/kg
106	SLPB 75.106.100	7,5 Ah	107,0 mm	102,0 mm	7,9 mm	2,5 mΩ	165 g	5 C	8 C	37,5 A	60,0 A	168 Wh/kg
106	SLPB 98.106.100	10,0 Ah	107,0 mm	103,0 mm	10,0 mm	3,0 mΩ	210 g	3 C	5 C	30,0 A	50,0 A	176 Wh/kg
70	SLPB 43.70.270	8,3 Ah	80,5 mm	270,5 mm	4,6 mm	3,2 mΩ	174 g	2 C	3 C	17,2 A	25,8 A	183 Wh/kg
70	SLPB 50.70.270	9,6 Ah	80,5 mm	270,5 mm	5,3 mm	3,0 mΩ	206 g	2 C	3 C	21,2 A	31,8 A	190 Wh/kg
70	SLPB 75.70.180	9,6 Ah	80,5 mm	181,5 mm	7,7 mm	2,8 mΩ	200 g	2 C	3 C	21,2 A	31,8 A	196 Wh/kg
70	SLPB 75.70.270	15,0 Ah	80,5 mm	269,5 mm	7,7 mm	2,0 mΩ	307 g	2 C	3 C	32,0 A	48,0 A	193 Wh/kg
106	SLPB 75.106.205	16,0 Ah	108,0 mm	207,0 mm	7,8 mm	3,8 mΩ	340 g	2 C	5 C	32,0 A	80,0 A	174 Wh/kg
High Power cells												
34	SLPB 59.34.59 H3	0,9 Ah	34,0 mm	59,0 mm	6,0 mm	16,0 mΩ	23 g	15 C	30 C	13,7 A	27,3 A	146 Wh/kg
34	SLPB 53.34.59 H4	0,7 Ah	34,0 mm	59,0 mm	5,2 mm	16,0 mΩ	21 g	20 C	40 C	14,8 A	29,6 A	130 Wh/kg
34	SLPB 65.34.96 H5	1,5 Ah	34,5 mm	102,0 mm	6,7 mm	6,0 mΩ	42 g	30 C	50 C	45,0 A	75,0 A	132 Wh/kg
34	SLPB 80.34.96 H5	1,8 Ah	34,5 mm	102,0 mm	8,2 mm	6,0 mΩ	54 g	30 C	50 C	54,0 A	90,0 A	124 Wh/kg
34	SLPB 90.34.96 H5	2,1 Ah	34,5 mm	102,0 mm	9,2 mm	5,0 mΩ	62 g	30 C	50 C	63,0 A	105,0 A	125 Wh/kg
34	SLPB 100.34.96 H5	2,4 Ah	34,5 mm	102,0 mm	10,2 mm	5,0 mΩ	68 g	30 C	50 C	72,0 A	120,0 A	131 Wh/kg
43	SLPB 50.43.128 H3	2,4 Ah	43,0 mm	128,0 mm	5,2 mm	7,0 mΩ	60 g	15 C	30 C	36,0 A	72,0 A	148 Wh/kg
43	SLPB 80.43.140 H5	3,2 Ah	43,5 mm	142,5 mm	8,2 mm	3,0 mΩ	93 g	30 C	50 C	96,0 A	160,0 A	127 Wh/kg
43	SLPB 86.43.140 H5	3,6 Ah	43,5 mm	142,5 mm	8,8 mm	3,0 mΩ	100 g	35 C	50 C	126,0 A	180,0 A	133 Wh/kg
43	SLPB 95.43.140 H5	4,0 Ah	42,5 mm	142,5 mm	9,7 mm	3,0 mΩ	114 g	30 C	50 C	120,0 A	200,0 A	130 Wh/kg
43	SLPB 108.43.140 H5	4,5 Ah	42,5 mm	142,5 mm	11,0 mm	3,0 mΩ	125 g	30 C	50 C	135,0 A	225,0 A	133 Wh/kg
43	SLPB 115.43.140 H5	5,0 Ah	42,5 mm	142,5 mm	11,7 mm	3,0 mΩ	132 g	35 C	50 C	150,0 A	250,0 A	140 Wh/kg
205	SLPB 55.205.130 H	11,0 Ah	210,0 mm	132,0 mm	5,6 mm	1,1 mΩ	280 g	8 C	10 C	88,0 A	110,0 A	145 Wh/kg
205	SLPB 60.205.130 H	13,0 Ah	210,0 mm	132,0 mm	6,3 mm	1,1 mΩ	325 g	8 C	10 C	104,0 A	130,0 A	148 Wh/kg
205	SLPB 70.205.130 P	12,0 Ah	210,0 mm	132,0 mm	7,5 mm	1,5 mΩ	345 g	15 C	20 C	180,0 A	240,0 A	129 Wh/kg
205	SLPB 78.205.130 H	16,0 Ah	210,0 mm	132,0 mm	7,7 mm	1,0 mΩ	400 g	8 C	10 C	128,0 A	160,0 A	148 Wh/kg

Evidence výpůjček

Prohlášení:

Dávám svolení k půjčování této bakalářské práce. Uživatel potvrzuje svým podpisem, že bude tuto práci řádně citovat v seznamu použité literatury.

Adam Podhrázký

V Praze dne

podpis:

Jméno	Katedra / Pracoviště	Datum	Podpis