Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Bakalářská práce

Dimenzování baterie studentské elektroformule

Autor práce: David Sonntag
Vedoucí práce: Ing. Luboš Streit, Ph.D.

Plzeň 2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**David SONNTAG**
Osobní číslo:	**E17B0095P**
Studijní program:	**B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Elektronika a telekomunikace**
Téma práce:	**Dimenzování baterie studentské elektroformule**
Zadávající katedra:	**Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte rešerši vhodných Li-ion článků.
2. Změřte základní parametry Li-ion článku.
3. Dimenzujte akumulátor pro elektroformuli splňující požadavky závodu.
4. Navrhněte mechanickou konstrukci akumulátoru vyhovující pravidlům soutěže.

Rozsah bakalářské práce:	**30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací:	**podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce:	**tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

https://www.fsaeonline.com/

Vedoucí bakalářské práce:	**Ing. Luboš Streit, Ph.D.** Regionální inovační centrum elektrotechniky
Datum zadání bakalářské práce:	**4. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce:	**11. června 2020**

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

Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

Abstrakt

Cílem práce bylo vypočítat energii potřebnou pro baterii elektroformule, zvolit na základě podrobné rešerže vhodný bateriový článek, ověřit jeho vlastnosti měřením a následně navrhnout, dimenzovat a alespoň částečně optimalizovat baterii studentské elektroformule pro závod FSG z hlediska výkonu, chlazení, výdrže baterie, životnosti, mechanické koncepce (především hmotnosti a mechanické odolnosti) a ceny.

Současný trend nahrazování fosilních paliv obnovitelnými zdroji s rozvojem výkonové elektroniky nabízí široké využití elektrických pohonů nejen v automobilovém průmyslu, ale i v daleko širších oblastech. Tato oblast využití si zasluhuje velkou pozornost a nemalé úsilí v objevování hranic a výhod tohoto nového trendu.

V práci je vypočítána energie baterie na základě předchozích měření z jízdy benzínové formule se stejnými mechanickými vlastnostmi a následně vybrán nejvhodnější bateriový článek z řad Li-Ion článků. Vybraný akumulátor je poté důkladně měřen z důvodu ověření jeho katalogových vlastností a zjištění dalších klíčových parametrů. Na základě toho je navrhnuta a dimenzována baterie, která splňuje nejenom elektrické a mechanické požadavky, ale také pravidla, která soutěž FSG stanovuje.

Vybrán byl článek od firmy Samsung INR21700-30T a z 600 kusů tohoto článku byla sestavena baterie s celkovou kapacitou 6,61kWh (konfigurace 120S5P) včetně mechanických prvků a dalších přídavných elektrických zařízení (pojistka, relé, kontrolní dioda, čidla, BMS,...).

Tato práce s navrženou baterií poslouží jako podklady k její následné výrobě a dalších prací na ní (zdokonalování a optimalizování jejích vlastností pro další ročníky soutěže). Dále se dá práce využít jako podklad k jiným návrhům baterií do jiných zařízení (nejenom vozidlům).

Klíčová slova

Dimenzování baterie elektroformule, akumulátor Samsung INR21700-30T, návrh baterie elektroformule, rešerže bateriových článků pro elektroformuli, studentská elektroformule ZČU FSG

Abstract

Sonntag, David. *Formula Student Accumulator Designing* [*Dimenzování baterie studentské elektroformule*]. Pilsen, 2020. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electromechanics and Power Electronics. Supervisor: Luboš Streit

---

The aim of the work was to calculate the energy required for the electroformula battery, select a suitable battery cell based on detailed research, verify its properties by measurement then design, dimension and at attempt to optimize the student electroformula battery for FSG plant in terms of performance, cooling, battery life, mechanical concepts (especially weight and mechanical resistance) and prices.

The current trend of replacing fossil fuels with renewable sources with the development of power electronics offers a wide use of electric tractions not only in the automotive industry, but also in much wider areas. This area of use deserves great attention and considerable effort in discovering the limits and benefits of this new trend.

In this work, the energy of the battery is calculated on the basis of previous measurements from driving a gasoline formula with the same mechanical properties and the most suitable battery cell is selected from the series of Li-Ion cells. The selected battery is then thoroughly measured to verify its catalog properties and determine other key parameters. Based on this, a battery is designed and dimensioned to fulfill not only the electrical and mechanical requirements, but also the rules set by the FSG competition.

A cell battery INR21700-30T from Samsung was selected and from 600 pieces of this cell battery was a battery with a total capacity of 6.61kWh was assembled (configuration 120S5P) including mechanical elements and other additional electrical devices (fuse, relay, control diode, sensors, BMS,...).

This work with the designed battery will serve as a basis for its subsequent production and other work on it (improving and optimizing its properties for the next years of the competition). Furthermore, the work can be used as a basis for other designs of batteries for other devices (not only vehicles).

Keywords

Sizing of the electroformula batterry, battery Samsung INR21700-30T, electroformula battery design, battery cell research for electroformula, student electrical formula UWB FSG

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

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

V Plzni dne 11. června 2020

David Sonntag

.....

Podpis

Obsah

Seznam obrázků **viii**

Seznam tabulek **x**

Seznam symbolů a zkratek **xi**

1 Úvod **1**

2 Akumulátory elektrické energie **2**
2.1 Akumulace energie 2
2.2 Elektrochemické články 2
2.2.1 Princip a rozdělení elektrochemických článků 3
2.2.2 Náhradní schéma (vnitřní model) akumulátoru 3
2.2.3 Základní vlastnosti bateriových článků 4
2.2.4 Druhy akumulátorů 6

3 Stanovení energie baterie **8**
3.1 Výpočet 8

4 Rešerže vhodných Li-Ion článků **13**

5 Měření základních parametrů Li-Ion článků **20**
5.1 Použité měřící metody |Převzato z [11]| 21
5.1.1 Měření kapacity vybíjecí metodou 21
5.1.2 Měření vnitřního odporu 22
5.2 Průběh měření 23
5.3 Výsledky měření 26
5.4 Zhodnocení výsledků měření 31

6 Návrh baterie **33**
6.1 Požadavky na návrh 33
6.2 Realizace návrhu 34
6.3 Shrnutí návrhu 44

7 Závěr **45**

Reference, použitá literatura **47**

Přílohy **50**

A Legenda k tabulkám **50**

B Ukázka naměřených dat ze závodu z jízdy benzínové formule **51**

C Tabulky z rešerže bateriových článků **52**

C.1 Druhá selekce bateriových článků – porovnání 92 bateriových článků z hlediska jejich katalogových parametrů 52

C.2 Třetí selekce bateriových článků – porovnání 18 bateriových článků (detailnější pohled na parametry článků pro sestavené provizorní baterie . . . 57

C.3 Porovnání provizorních baterií sestavených ze 4 porovnávaných článků . . . 60

Seznam obrázků

2.1 Náhradní model akumulátoru |Převzato z [11]| 4

3.1 Závislost výkonu vozu na čase jednoho kola závodu 10
3.2 Průběh kladné části celkového výkonu vozu se znázorněním efektivního výkonu 11

4.1 Závislost okamžitého odebíraného proudu článků v čase 18
4.2 Závislost oteplení na dosažené kapacitě baterie při vybíjecím proudu 15A |Převzato z [3]| 19
4.3 Závislost oteplení na dosažené kapacitě baterie při vybíjecím proudu 30A |Převzato z [3]| 19

5.1 Princip měření vnitřního odporu akumulátoru stejnosměrnou metodou |Převzato z [11]| 23
5.2 Schéma zapojení při měření na akumulátoru INR21700-30T 24
5.3 Průběh nabíjecích charakteristik obou článků po vybíjení 10A (závislost napětí článku a nabíjecího proudu na kapacitě článku) 28
5.4 Vybíjecí charakteristiky obou článků (závislost napětí na dosažené kapacitě pro různé vybíjecí proudy) 29
5.5 Závislost teploty obou článků při vybíjení různými proudy na dosažené kapacitě 31

6.1 Článek Samsung INR21700-30T |Převzato z [3]| 34
6.2 3D model nosné mřížky článků – základ segmentu 34
6.3 3D model sestaveného segmentu 35
6.4 3D model realizace propojení dvou segmentů 36
6.5 Vybraný stykač EV200 |Převzato z [17]| 37
6.6 Vybraná pojistka PSR030FL0200Z |Převzato z [18]| 37
6.7 Vybraný vlnovod pro signální LED diodu 1216.1005 MENTOR |Převzato z [19]| 38
6.8 Vybraný komunikační konektor AS007-35PA |Převzato z [20]| |Převzato z [21]| 40
6.9 Vybraný výkonový konektor CTHEB2-12 |Převzato z [22]| 41
6.10 3D model kontejneru akumulátoru 41
6.11 3D model navržené baterie pohled 1 42

6.12 3D model navržené baterie pohled 2 43
6.13 3D model navržené baterie včetně vík 43

Seznam tabulek

3.1 Přehled konstant pro výpočet celkové energie baterie 9
3.2 Určování kapacity baterie 11

4.1 Porovnávané parametry bateriových článků a jejich váhy 14
4.2 Určení skutečné kapacity při daném vybíjecím proudu 16
4.3 Tabulka porovnání efektivních proudů pro jednotlivé články 17

5.1 Katalogové parametry článku INR21700-30T |Převzato z [12]| 21
5.2 Tabulka použitých měřících přístrojů 25
5.3 Shrnutí výsledků měření článku A 27
5.4 Shrnutí výsledků měření článku B 27
5.5 Určování vnitřního odporu článku A 29
5.6 Určování vnitřního odporu článku B 29
5.7 Hodnoty průměrného vnitřního odporu a ztrátový výkon obou článků . . . 30

6.1 Parametry navrženého akumulátoru elektroformule 44
6.2 Seznam použitých elektronických komponent v akumulátoru elektroformule a jejich typy 44

A.1 Tabulka zobrazující významy barev v použitých tabulkách v celém dokumentu 50

B.1 Výčet naměřených dat ze závodu benzínové formule použitých pro určení energie baterie (data odpovídají nejrychlejšímu kolu) 51

C.1 Výsledky první selekce a porovnání 92 článků z hlediska jejich katalogových parametrů (články seřazeny sestupně podle umístění - 1-23) 53
C.2 Výsledky první selekce a porovnání 92 článků z hlediska jejich katalogových parametrů (články seřazeny sestupně podle umístění - 24-46) 54
C.3 Výsledky první selekce a porovnání 92 článků z hlediska jejich katalogových parametrů (články seřazeny sestupně podle umístění - 47-69) 55
C.4 Výsledky první selekce a porovnání 92 článků z hlediska jejich katalogových parametrů (články seřazeny sestupně podle umístění - 70-92) 56
C.5 Sestavené provizorní baterie pro detailnější porovnání článků část 1 58
C.6 Sestavené provizorní baterie pro detailnější porovnání článků část 2 59

C.7 Porovnání provizorních baterií sestavených ze 4 porovnávaných článků část 1 61
C.8 Porovnání provizorních baterií sestavených ze 4 porovnávaných článků část 2 62

Seznam symbolů a zkratek

$a(a_L)[m/s^2]$	Zrychlení (podélné)
$C_K[-]$	Poměr kapacity dosažené při daném vybíjecím proudu ku jmenovité
$C_N(C_{CAP})[Ah]$	Jmenovitá kapacita bateriového článku
$C_P[F]$	Paralelní kapacita bateriového článku
$C_V[mAh]$	Vypočítaná dosažená kapacita
$C_{VYB}[Ah]$	Kapacita článku dosažená při daném vybíjecím proudu
$C_X[-]$	Součinitel aerodynamického odporu
$C_Z[mAh]$	Změřená dosažená kapacita
$d[mm]$	Průměr/šířka bateriového článku
$E_B[kW/h]$	Jmenovitá energie baterie
$E_M[Wh/kg]$	Měrná energie
$E_V[Wh/dm^3]$	Hustota energie
$E_{VYB}[kW/h]$	Celková energie baterie dosažená při daném vybíjecím proudu
$F(\vec{F})[N]$	Síla (vektor síly)
$g(g_R, g_P)[m/s^2]$	Tíhové zrychlení (na rovníku, na pólech)
$h[mm]$	Výška bateriového článku
$I_C[A]$	Efektivní vybíjecí proud tekoucí jedním bateriovým článkem
$I_{CP}[A]$	Efektivní vybíjecí proud tekoucí celou baterií
$I_{LOAD}[A]$	Zatěžovací proud při měření vnitřního odporu
$I_{MAX}[A]$	Maximální trvalý vybíjecí proud bateriového článku
$I_{VYB}[A]$	Vybíjecí proud
$K[-]$	Počet vypočítaných hodnot vnitřního odporu
$l[mm]$	Tloušťka bateriového článku
$m[kg]$	Hmotnost (obecně)
$m_N[g]$	Hmotnost bateriového článku
$M[kg]$	Celková hmotnost baterie
$N[-]$	Celkový počet bateriových článků baterie
$N_S(X_S)[-]$	Počet bateriových článků zapojených sériově
$N_P(Y_P)[-]$	Počet bateriových článků zapojených paralelně
$O_v[N]$	Aerodynamický odpor (síla)
$P[W]$	Výkon

$P_{AC}[W]$	Acceleration Power
$P_{AD}[W]$	Aero Drag Power
$P_B[W]$	Jmenovitý výkon dodávaný baterií
$P_{ef}[W]$	Efektivní výkon
$P_{GB}[W]$	Měrný výkon baterie
$P_{MINB}[W]$	Minimální výkon dodávaný baterií
$P_Z[W]$	Měrný ztrátový výkon akumulátoru
$\rho[kg/m^3]$	Hustota vzduchu
$\vec{r}[m]$	Vektor dráhy
$R_i[\Omega]$	Vnitřní odpor bateriového článku ($R_S + R_P$)
$R_{ij}[\Omega]$	Dílčí vnitřní odpor
$R_{ip}[\Omega]$	Průměrná hodnota vnitřního odporu
$R_P[\Omega]$	Paralelní odpor bateriového článku
$R_S[\Omega]$	Sériový odpor bateriového článku
$S_X[m^2]$	Čelní plocha vozu
$\Delta t[^\circ C]$	Míra oteplení
$t[s]$	Čas
$t_{MAX}[^\circ C]$	Maximální trvalá provozní teplota bateriového článku (katalogová hodnota)
$t_{VYB}[min:s]$	Celková doba vybíjení
$T_B[^\circ C]$	Teplota bateriového článku (před měřením)
$T_{MAX}[^\circ C]$	Maximální dosažená teplota bateriového článku (změřená hodnota)
$T_O[^\circ C]$	Okolní teplota
$U[V]$	Jmenovité napětí baterie
$U_0[V]$	Hodnota napětí ideálního zdroje napětí v náhradním modelu bateriového článku
$U_{0B}[V]$	Napětí bateriového článku naprázdno
$U_{LOAD}[V]$	Napětí bateriového článku ihned po zatížení a ihned po zotavení
$U_{MAX}[V]$	Maximální napětí baterie
$U_{MIN}[V]$	Minimální napětí baterie
$U_{MINK}[V]$	Minimální napětí baterie pro U_{NK} jednotlivých článků
$U_N(C_{BAT})[V]$	Jmenovité napětí bateriového článku
$U_{NK}[V]$	Napětí bateriového článku v tzv. koleni vybíjecí charakteristiky
$U_{NMAX}[V]$	Maximální napětí bateriového článku
$U_{NMIN}[V]$	Minimální napětí bateriového článku
$v[m/s]$	Rychlost
$V[dm^3]$	Celkový objem baterie
$W[J]$	Energie/práce

AIR(s)	Izolační Relé Akumulátoru
BMS	Battery Menegament Systém
ČVUT	České vysoké učení technické
DC	Stejnosměrný proud
DoD	Depth of Discharge
FSAE	Formula Society of Automotive Engineers
FSG	Formula Student Germany
HV	Systém vysokého napětí (Vysoké napětí)
LVS	Systém nízkého napětí
MP	Maintenance Plugs
SoC	State of charge
SoH	State of Health
WET	Way to end of the test (Způsob ukončení testu)

1

Úvod

Důvodem vzniku tohoto projektu bylo sestavit formuli čistě na elektrický pohon, reprezentovat Západočeskou univerzitu na mezinárodních soutěžích a dále prohloubit znalosti a zkušenosti v problematice týkající se výkonové elektroniky a pohonů. Cílem této práce bylo navrhnout, dimenzovat a optimalizovat baterii pro studentskou elektroformuli pro závody FSG ve spolupráci s kolegy z Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Jelikož bylo zamýšleno účastnit se s formulí závodů FSG, bylo nutné dodržovat pravidla, která tato soutěž stanovuje. Z těch nejdůležitějších pravidel stojí za zmínku omezení výkonu a napětí baterie, požadavky na izolaci a vlastnosti použitých materiálů, mechanické a konstrukční požadavky, požadavky na odolnost baterie, bezpečnost aj.

Jedním z klíčových parametrů baterie je její kapacita, která byla vypočítána z naměřených dat během závodu benzínové formule se shodnými fyzikálními parametry. Jelikož se jednalo o data z jednoho jediného závodu pro jeden typ trati, byly vypočtené parametry nadimenzovány tak, aby baterie spolehlivě splnila zadané požadavky. Dále bylo potřeba po důkladné rešerži vybrat vhodný článek a to z řad Li-Ion (důvodem vybrání tohoto typu bateriových článků byly právě jeho vlastnosti), ověřit jeho parametry měřením a následně v souladu s pravidly navrhnout a dimenzovat samotnou baterii.

Jelikož se této soutěže účastní mnoho týmů po celém světě po mnoho let, je možné nalézt na internetu návrhy jiných baterií do podobných formulí, které mohou mít, jak podobný postup řešení tohoto problému, tak i obdobný výsledek. Projekt studentské elektroformule je na ZČU v počátcích svého vzniku a jedná se o první návrh této baterie, proto je tato práce částečně inspirována prací jiných týmů a srovnává se i s parametry jejich baterií a formulí, aby byl návrh nesen v duchu ověřených postupů a nedošlo tak k nefunkčnímu konceptu celé baterie, a aby se dalo na následujícím návrhu dále stavět a formule se dala dále vylepšovat.

2

Akumulátory elektrické energie

2.1 Akumulace energie

Už od vynalezení elektřiny řeší lidstvo otázku, jak danou energii uložit k pozdějšímu využití. Ukládání elektrické energie je ekonomicky výhodné a obzvláště v dnešní době, kdy se mění pohled na energetiku a přechází se na obnovitelné zdroje, se tato otázka hodně řeší. Cílem je v dobách přebytků elektrickou energii ukládat na dobu, kdy je jí nedostatek. Toto se ale netýká pouze energetiky, ale průmyslu obecně. Možností akumulovat elektrickou energii je mnoho. Jedny z nejrozšířenějších způsobů akumulace elektrické energie jsou v současné době přečerpávací vodní elektrárny a paroplynové elektrárny. Jejich akumulace spočívá v potenciálu vody a plynu (dalším ekvivalentem je akumulace do stlačeného vzduchu). Další možnosti jsou: akumulace ve vodíku, setrvačník, superkapacitory, supravodivé cívky aj..

Jedním z nejstarších a pro komerční použití nejrozšířenějším způsobem akumulace energie jsou elektrochemické články (bateriové články - baterie). Jejich historie sahá až do 19. století k Alessandro Voltovi a jsou neustále vylepšovány a zdokonalovány. Jejich použití je opravdu rozsáhlé, od ovladačů k televizi, přes baterie v elektromobilech až po velkokapacitní úložiště sloužící distribuční síti. |Převzato z [7]|

2.2 Elektrochemické články

Elektrochemické, bateriové nebo galvanické články jsou nejčastějším úložištěm a zdrojem elektrické energie obecně a i v automobilovém průmyslu tomu není jinak. Tato práce se zabývá návrhem baterie do elektrické formule a právě elektrochemické články jsou základním stavebním prvkem navrhované baterie, a to díky jejich rozšíření (jsou tak považovány za správný směr vývoje). Jejich rozšíření je také dáno jejich výhodami - jsou relativně levné, stabilní, vyrábí se v širokém rozsahu rozměrů, typů, velikostí vybíjecích proudů, teplotních rozsahů apod., dále jsou snadno dostupné, regulovatelné a bezpečné.

2.2.1 Princip a rozdělení elektrochemických článků

Jak již napovídá název, elektrochemický článek (dále jen bateriový článek) je zdroj stejnosměrného proudu pracující na základě chemické reakce, jejíž produktem jsou, mimo jiné, volné elektrony, které mají za následek vznik elektrického potenciálu. Každý článek se zpravidla skládá z kladné a záporné elektrody, elektrolytu a separátoru.

Záporná elektroda – skládá se z aktivní hmoty a v průběhu reakce uvolňuje volné elektrony. Říkáme jí katoda.

Kladná elektroda – při reakci dochází k redukci, což znamená, že elektrony přijímá. Nazývá se anoda.

Separátor – jedná se o porézní membránu, která slouží k vzájemnému oddělení různých polarit a zamezuje tak zkratům. Díky ní dochází k propustnosti iontů, bez čehož by bateriový článek nefungoval.

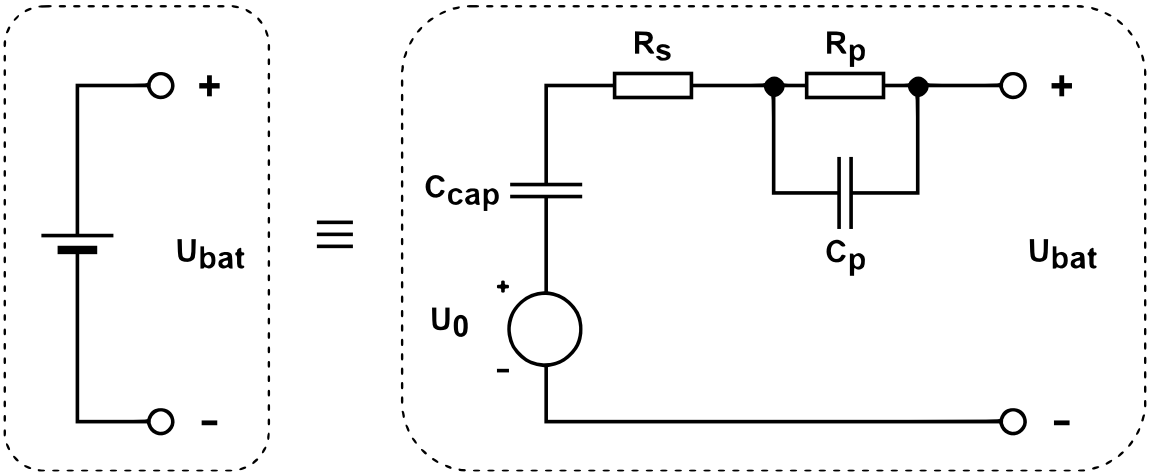
Elektrolyt – jedná se o pevnou nebo kapalnou látku, která má iontovou vodivost, tzn. obsahuje volné elektrony nezbytné pro průchod elektrického proudu mezi elektrodami.

Obecně můžeme bateriové články rozdělit do tří typů:

- **Primární článek** – po vybití se nedá znovu nabít a stává se z něj odpad, protože je materiál záporné elektrody při vybíjení spotřebován. Jsou rozšířené pouze v nízkopříkonových zařízeních (ovladače, drobná elektronika,...).
- **Sekundární článek** – díky svojí konstrukci je možné jej opakovaně vybíjet a nabíjet, protože uvnitř článku dochází k vratným chemickým procesům. Díky této vlastnosti můžeme sekundární články nazývat akumulátory (z toho vyplývá rozsah jejich použití).
- **Palivové články** – zde je energie získávána z reakce paliva s okysličovadlem, aniž by došlo k porušení struktur.

2.2.2 Náhradní schéma (vnitřní model) akumulátoru

Náhradní schéma akumulátoru viz obrázek 2.1 je nejběžnější model sloužící k popisu jeho parametrů. Vnitřní model je složen z ideálního zdroje napětí U_0 (napětí naprázdno), kondenzátoru C_{CAP} (celková kapacita akumulátoru), rezistoru R_S (vnitřní odpor akumulátoru) a dále paralelní kombinaci R_P a C_P (difuze a přenos náboje mezi elektrolytem a elektrodami akumulátoru). U_{BAT} je pak jmenovité napětí akumulátoru.



Obr. 2.1: Náhradní model akumulátoru |Převzato z [11]|

Dá se psát vztah mezi kapacitou akumulátoru uváděnou v ampérhodinách a kapacitou kondenzátoru C_{CAP} uváděnou ve faradech, který říká, že jsou tyto dvě kapacity stejné. Jelikož platí vzorce $C = Q/U$ a zároveň $Q = I.t$, dá se psát, že $C.U = I.t$. Po vyjádření dostaneme vzorec 2.1. Pokud dosadíme do čitatele hodnotu v jednotkách ampérsekunda a do jmenovatele hodnotu ve voltech, dostáváme kapacitu C_{CAP} ve faradech. |Převzato z [11]|

$$C_{CAP} = \frac{I.t}{U}[F] \tag{2.1}$$

2.2.3 Základní vlastnosti bateriových článků

Při výběru vhodného bateriového článku pro danou aplikaci je nutno vycházet ze základních vlastností a parametrů, kterými se bateriové články vyznačují, a které se mohou pohybovat v širokém rozsahu hodnot.

Jmenovité napětí $U_N[V]$ – jedná se velice důležitý parametr. Často slouží k označení článku a nejčastěji se jedná o zaokrouhlenou střední hodnotu vybíjecího napětí.

Jmenovitá kapacita $C_N[Ah]$ – odpovídá celkovému elektrickému náboji, který může akumulátoru při vybíjení za daných podmínek dodat. Vypočítá se jako součin vybíjecího proudu a doby vybíjení.

Energetická účinnost cyklu – je dána poměrem elektrické energie, která byla z akumulátoru odebrána a elektrické energie, která byla do baterie při nabíjení dodána.

Měrná energie $E_M[Wh/kg]$ – říká, jaké je maximální množství elektrické energie vztažené k 1kg akumulátoru.

Hustota energie $E_V[Wh/dm^3]$ – říká, jaké je maximální množství elektrické energie vztažené k jednomu dm^3 akumulátoru.

Životnost – je definovaná jako doba, po kterou lze bateriový článek za daných podmínek používat. Zpravidla bývá garantována výrobcem a udává se buď v čase (měsíce, roky) nebo v počtu cyklů. Životnost akumulátoru je samozřejmě dána provozními podmínkami, způsobem používání a vlivem okolí. Standardně se jako konec životnosti považuje stav, kdy klesne kapacita akumulátoru při nabíjení pod 80% jmenovité kapacity. To ale neznamená, že už není možné akumulátoru dále používat.

Samovybíjení – jedná se o nevratný a nežádoucí proces, kdy akumulátor samovolně ztrácí energii, aniž by byl připojen k zátěži nebo jinak vybíjen. Tento proces přímo souvisí se stabilitou akumulátoru a je závislý na okolních podmínkách, ve kterých se akumulátor nachází. |Převzato z [8]| |Převzato z [9]|

Maximální vybíjecí proud – je proud, kterým je možno trvale a opakovaně vybíjet akumulátor (za předpokladu splnění teplotního rozsahu), aniž by došlo k jeho poškození.

Také je třeba definovat některé další vlastnosti a parametry akumulátorů. Prvním takovým parametrem je **pracovní rozsah napětí**, který udává rozsah napětí od plného nabití po úplné vybití (meze jsou zpravidla určeny výrobcem a po jejich překročení může docházet ke snížení životnosti akumulátoru). Dále pak **dostupná kapacita**, která se od jmenovité kapacity liší, protože její velikost závisí na vybíjecím proudu, napětí po ukončení vybíjení, teplotě a životnosti akumulátoru.

S kapacitou akumulátoru blízce souvisí pojmy **SoC**, **DoD** a **SoH**. SoC neboli State of Charge je stav nabití, který procentuálně vyjadřuje aktuálně dostupnou kapacitu v akumulátoru. Naopak DoD neboli Depth of Discharge je hloubka vybití, také se udává v procentech a je inverzní k SoC. SoH neboli State of Health v procentech vyjadřuje aktuální stav akumulátoru vzhledem k jeho životnímu cyklu.

Dalšími parametry jsou **nabíjecí parametry**, které jsou doporučeny výrobcem, a které je nutné bezpodmínečně dodržovat, aby nedošlo ke snížení životnosti akumulátoru a snížení dosažené kapacity při nabíjení (uvádí se nabíjecí proud, napětí a ukončovací proud tzv. "cut-off current"). **Vybíjecí parametry** jsou parametry také udávané výrobcem a i ty je nutné respektovat ze stejných důvodů (zpravidla je uváděn maximální vybíjecí proud a ukončovací napětí tzv. "cut-off voltage").

Velmi důležitým parametrem je **vnitřní odpor**, který určuje, jak velký proud lze z článku odebírat a k jak velkému poklesu napětí při zatížení dojde. Závisí na DoD, SoH a

teplotě, ale často výrobci není udávaný.

V neposlední řadě se také udává rozsah provozních teplot, ve kterém akumulátor pracuje. Z pravidla výrobce udává rozsah teplot akumulátoru při nabíjení (běžně 0-50°C), vybíjení (běžně -20-60°C) a při krátkodobém a dlouhodobém skladování. Překročení těchto hodnot opět vede ke snížení životnosti akumulátoru nebo dokonce k jeho zničení. Akumulátory se vyznačují další řadou závislostí a vlastností, které zde ale vzhledem k rozsahu práce nejsou uvedeny. |Převzato z [11]|

2.2.4 Druhy akumulátorů

Olověné články – v těchto článcích jsou olověné desky, které mají kladnou nebo zápornou polaritu (těch se zápornou polaritou je o jednu více). Jednotlivé desky jsou odděleny separátorem, aby nedošlo k jejich dotyku. Separátor zároveň zpevňuje konstrukci celé baterie. Desky jsou napůl ponořeny do kyseliny sírové a pod nimi se nachází odkalovací prostor pro uvolněný materiál. Všechny desky stejné polarity jsou spojeny a jejich vývod je vyveden na horní stranu článku, kam se připojují kabely. Dříve byly používané v automobilovém průmyslu.

- Napětí: 2,0-2,15V
- Proud: řádově několik násobků jmenovité kapacity
- Výhody: elektrická robustnost, cena
- Nevýhody: velké rozměry a hmotnost, dlouhá doba nabíjení, malá životnost, náročné na údržbu, teplotně nestálé

NiCd baterie – kladná elektroda (anoda) je tvořena hydroxidem nikelnatým s příměsí grafitu a záporná elektroda (katoda) je tvořena hydroxidem kademnatým. Separátor je zpravidla tvořen polypropylenem a jeho úkol je oddělit od sebe elektrody. Elektrolyt je roztok hydroxidu draselného. Jsou pokrokovější oproti olověným bateriím, ale dnes už se také nepoužívají. Jeden z důvodů je, že obsahují kadmium (vysoce jedovaté).

- Napětí: 1,2V na článek
- Proud: krátkodobě až desetinásobek kapacity článku
- Výhody: vysoká odolnost, životnost, rozsah pracovních teplot
- Nevýhody: nízká hustota energie, nízká účinnost, na konci vybíjení prudký pokles napětí

NiMH baterie - Nikl-metal akumulátor je pokročilejší varianta NiCd akumulátorů. Oproti NiCd akumulátoru má vyšší měrnou energii a hustotu energie a je šetrnější pro životní prostředí. Ještě relativně nedávno byl nasazován do hybridních vozů, dnes je již na ústupu.

- Napětí: 1,2V na článek
- Výhody: malý paměťový efekt, vyšší hmotnostní i objemová kapacita
- Nevýhody: mechanicky méně odolné, vyšší míra samovybíjení, větší vnitřní odpor, nízká účinnost a životnost

Li-Ion baterie – tato baterie má elektrody vytvořené z interkalačních sloučenin. Jedná se o sloučeniny, které mohou do své atomové mřížky přijmout cizí atom nebo molekulu. Elektrolyt se skládá z vodivé soli a rozpouštědla. Separátor bývá vyroben z velmi tenké porézní fólie většinou z polyetylenu nebo polypropylenu. V dnešní době jsou nejrozšířenější pro komerční použití i v průmyslu. Prozatím představují nejvyspělejší řešení.

- Napětí: 3,6-3,7V
- Proud: 2-3C (2-3 násobek jmenovité kapacity)
- Výhody: vysoká měrná energie a hustota energie, vysoká účinnost, velká životnost, vysoké napětí
- Nevýhody: ztrácí kapacitu s časem bez ohledu na používání, citlivé na teploty, úplné vybití může způsobit jejich zničení, nízké nabíjecí (vybíjecí) proudy

Li-Pol baterie – jedná se o lithium-polymerový akumulátor a je to další vývojový stupeň v bateriích a je velice podobný Li-Ion bateriím. Při jeho přepětí hrozí exploze, proto se doporučuje monitorovat každý článek zvlášť. Jeho použití je zejména v trakčních pohonech.

- Napětí: 3,65V na článek
- Výhody: velká měrná energie a hustota energie, vysoká účinnost, nízké samovybíjení
- Nevýhody: nebezpečí výbuchu, malá elektrická robustnost, nízká životnost

Druhů akumulátorů je opravdu mnoho. Neustále je snaha vytvářet akumulátory s lepší koncepcí, aby se jejich parametry přibližovaly ideálním s ohledem na cenu. Mezi další známé a běžně používané druhy akumulátorů patří: Ni-Fe akumulátory, Lithium-železo fosfátové akumulátory, superkapacitory, LFP akumulátory, aj. |Převzato z [9]| |Převzato z [10]|

3

Stanovení energie baterie

Tato kapitola se zaměřuje na určení nejdůležitější hodnoty, kterou baterie má, a tou je její kapacita. Jinými slovy, bylo zapotřebí vypočítat energii potřebnou k ujetí závodu. Na závodech FSG je několik různých disciplín, ve který je možné porovnávat své vozidlo s vozidly soupeřů. Z toho tři disciplíny jsou mířeny na jízdní vlastnosti tzv. dynamické disciplíny (Acceleration – sprint na 75m, Autocross – slalom a Endurance – závod na 22km). Každá disciplína je bodově ohodnocena a z celkového počtu 1000 bodů je možné získat za disciplínu Acceleration 75 bodů, za Autocross 100 bodů a za Endurance 325 bodů, z čehož vyplývá, že přednostně bylo cíleno na úspěch v disciplíně Endurance. Zbylých 500 bodů je za disciplíny nesouvisejícími s jízdními vlastnostmi formule.

Z toho vyplývá, že kapacita akumulátoru musela být taková, aby bylo vozidlo schopno ujet závod na 22km, pokud možno na plný výkon, čili s určitou rezervou energie a zároveň taková, aby akumulátor nebyl příliš předimenzovaný a tudíž těžký. Vycházelo se z předpokladu, že vozidlo s kapacitou akumulátoru na 22km závod bude schopno bez problémů zvládnout i ostatní dynamické disciplíny.

Z počátku bylo nutné určit, v jakým mezích by se měla kapacita baterie reálně pohybovat. K tomu velice dobře posloužily magazíny, které každý rok po skončení závodů organizace FSG vydává (tzv. FSG Magazine). |Převzato z [4]| |Převzato z [5]| |Převzato z [6]| Magazíny obsahují mimo jiné i technické parametry formulí jednotlivých týmů. Po důkladné analýze těchto dat z ročníků 2017-2019 bylo dosaženo závěru, že reálná kapacita baterie by se mohla pohybovat v rozmezí hodnot 6-8kWh (se zohledněním jednotlivých parametrů formulí daných týmů i jejich umístění v soutěži).

3.1 Výpočet

Tato hypotéza byla následně ověřena výpočty a to kvůli zpřesnění odhadu. Ve spolupráci s týmem Fakulty strojní, byla na vyžádání zpřístupněna naměřená data ze závodu z jízdy benzínové formule. Tato data byla formou tabulek a grafů, zachycujících jedno kolo zá-

vodu na 22km (jejich výčet je v příloze B). Změřená data obsahují rychlost a podélné zrychlení odpovídající danému času a ujeté vzdálenosti. Výpočet energie byl realizován s pomocí konstant (viz tabulka 3.1) a Newtonových pohybových zákonů.

Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Hmotnost vozu	m	290	kg
Součinitel aerodynamického odporu	C_X	1,35	—
Hustota vzduchu	ρ	1,23	kg/m^3
Čelní plocha vozu	S_X	1,25	m^2
Tíhové zrychlení	g	9,81	m/s^2

Tab. 3.1: Přehled konstant pro výpočet celkové energie baterie

Hmotnost vozu byla stanovena na 290kg včetně řidiče (uvažováno 68kg).

Tíhová síla v tabulce 3.1 je vypočítaná podle vzorce 3.1 jako průměr tíhový sil na pólu a na rovníku.

$$g = \frac{g_P + g_R}{2} = \frac{9,78 + 9,832}{2} = 9,806 \doteq 9,81 m/s^2 \tag{3.1}$$

Ze znalostí fyziky je známo, že výkon je veličina vyjadřující množství práce vykonané za jednotku času. Z definice pro dráhové účinky síly tedy vyplývá vzorec pro okamžitý výkon (3.2),

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{\vec{F}.d\vec{r}}{dt} = \vec{F}.\vec{v} \quad [W] \tag{3.2}$$

kde P je okamžitý výkon, W je práce, r je dráha, F je síla konající práci a v je okamžitá rychlost. Obecně se dá také napsat, že síla se vypočítá jako součin okamžitého zrychlení a hmotnosti hmotného bodu nebo tělesa (3.3).

$$\vec{F} = m.\vec{a} \quad [N] \tag{3.3}$$

Okamžitá rychlost je známa, dále bylo nutné spočítat působící sílu. Na formuli působí dvě rozdílné síly, které tvoří dvě složky celkového výkonu (P_{AD} a P_{AC}), kde P_{AC} je Acceleration Power, jehož působící síla je podélné zrychlení (okamžitá hodnota podélného zrychlení je známa) a je to výkon potřebný k rozpohybování vozidla a P_{AD} je Aero Drag Power, jehož působící síla je aerodynamický odpor (O_V) a jedná se o výkon potřebný k překonání odporových sil.

$$O_v = \frac{1}{2}.C_X.R_O.S_X.v^2 \quad [N] \tag{3.4}$$

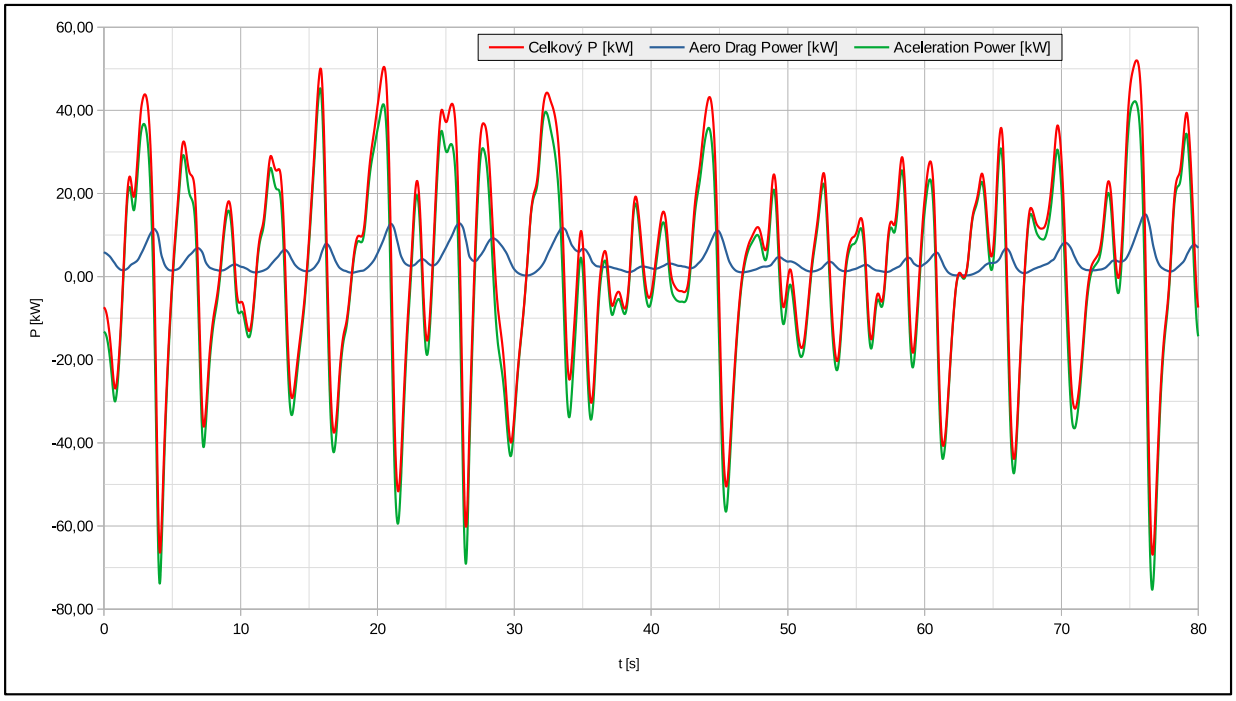
Výpočet aerodynamického odporu znázorňuje vzorec 3.4, kde v je okamžitá rychlost, potom P_{AD} (3.5) a P_{AC} (3.6) bude

$$P_{AD} = O_v.v \quad [W] \tag{3.5}$$

$$P_{AC} = a_L.g.m.v \quad [W] \tag{3.6}$$

kde součin a_L a m znázorňuje působící sílu (podle vzorce 3.3) a v je opět okamžitá rychlost. Konstanta g je zde pro přepočet podélného zrychlení z jednotek $[g]$ na $[m/s^2]$. Celkový výkon (viz rovnice 3.7) je roven součtu P_{AD} a P_{AC} a jedná se o okamžitý výkon v daném čase (závislost je zanesena grafu viz 3.1).

$$P = P_{AD} + P_{AC} \quad [W] \tag{3.7}$$



Obr. 3.1: Závislost výkonu vozu na čase jednoho kola závodu

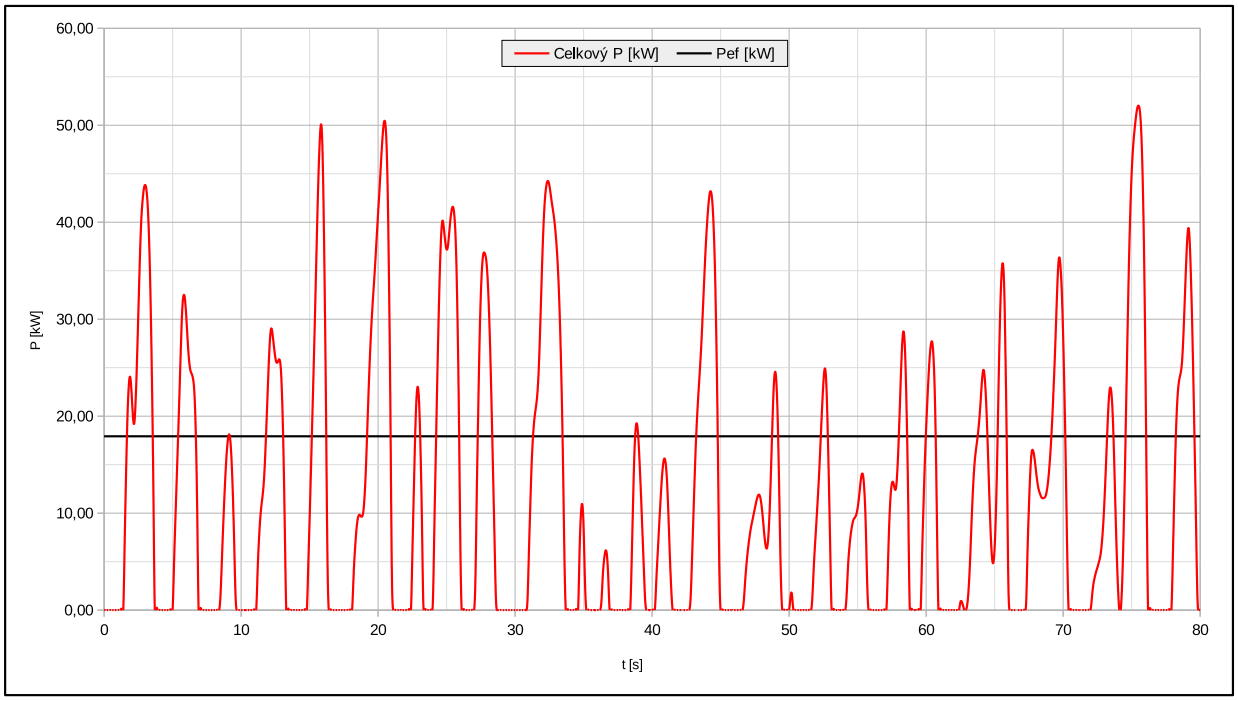
Z grafu je patrné, že hodnoty výkonů dosahovaly i záporných hodnot a to v místech, kde formule brzdila (důvodem je, že při zpomalování má vektor zrychlení zápornou hodnotu). Vzorec 3.8, získaný úpravou vzorce 3.2, reprezentuje plochu pod křivkou, čili celkovou energii vykonanou vozem, kde P je celkový okamžitý výkon.

$$W = \int_0^t P dt \quad [J] \tag{3.8}$$

Ve výpočtu byla zahrnuta jen kladná část výkonu (viz obrázek 3.2), protože nebyla uvažována rekuperace energie, i když ve skutečnosti k částečné rekuperaci energie dochází bude. Pro zjednodušení výpočtu byl integrál (3.8) nahrazen diskrétním integrálem s nejmenším možným krokem 0,1s (3.9).

$$W = \sum_{i=1}^{N} (P_i.dt) \quad [J] \tag{3.9}$$

Kde P_i je celkový výkon v daném časovém okamžiku a dt je elementární časová změna mezi dvěma změřenými veličinami. Výsledná energie byla poté součtem všech součinů okamžitých výkonů a elementárního časového úseku ($dt = 0{,}1$s).



Obr. 3.2: Průběh kladné části celkového výkonu vozu se znázorněním efektivního výkonu

Výsledkem byla energie potřebná na ujetí jednoho kola tohoto konkrétního závodu, a jelikož se tento závod jel na 18 kol, bylo třeba výsledek vynásobit 18. Protože se ale jednalo o záznam z nejlepšího kola, byla přidána 10% rezerva a dále bylo přidáno dalších 15% rezervy energie na nečekané vlivy zahrnující jinou trať a dalších 5% na krytí ztrát (viz tabulka 3.2).

Kapacita [kWh]	**Poznámka**
0,252	jedno kolo
4,534	celý závod
6,023	**Výsledná – včetně rezerv**

Tab. 3.2: Určování kapacity baterie

Celková energie, kterou musí baterie pojmout je **6,023kWh**. Tato hodnota je poměrně nízká (v porovnání s kapacitami baterií ostatních týmů), ale protože nebyla uvažována rekuperace energie a byla přidána dostatečná rezerva, byla tato hodnota považována za směrodatnou a kapacita jako plně dostačující.

Obrázek 3.2 obsahuje i hodnotu efektivního výkonu (P_{ef}), který byl použit pro výběr nejvhodnějšího bateriového článku a jeho funkce bude rozebrána v kapitole 4. Vzorec 3.10 ukazuje výpočet. Výpočet efektivního výkonu byl upraven do podoby diskrétního integrálu s dostatečným krokem (vzorec 3.11), kde P_i je hodnota okamžitého výkonu a dt je elementární časový úsek. Efektivní výkon vyšel 17,92kW.

$$P_{ef} = \sqrt{\int_0^t P^2 dt} \quad [W] \tag{3.10}$$

$$P_{ef} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (P_i^2 dt)} \quad [W] \tag{3.11}$$

4

Rešerže vhodných Li-Ion článků

V této kapitole je rozebrána rešerže vhodných článků pro formuli. Bude zde postupně popsán a zdůvodněn postup výběru nejvhodnějšího článku.

Vzhledem k vlastnostem primárních článků a k tomu, že pravidla soutěže zakazují použití palivových článků, je zřejmé, že se navržená baterie bude skládat ze sekundárních článků, a to konkrétně z článků ze skupiny Li-Ion článků z důvodů jejich vynikajících vlastností.

Nejdůležitější kritéria výběru článku:

- Odebíraný proud
- Kapacita
- Měrná energie
- Hustota energie
- Míra oteplení
- Maximální teplota článku
- Tvar vybíjecí charakteristiky
- Dostupnost

Celkově se jednalo o nejdůležitější a nejsložitější část celé práce. Výběr vhodného článku vyžadoval komplexní pohled na jednotlivé porovnávané parametry, jejich vzájemné propojení a danou váhu porovnávaných parametrů. Nevýhodou však bylo, že údaje v datasheetech od výrobců článků obsahují jmenovité parametry, které se mohou od skutečných lišit, což se nejvíce projevilo na kapacitě, která se snižuje s rostoucím vybíjecím proudem. Další důležité a většinou neuváděné parametry je míra oteplení článku a střední ztrátový

výkon, které hrály rozhodující roli při výběru a při optimalizaci chlazení.

Jako kompenzace těchto negativ výborně posloužila stránka lygte-info.dk |Převzato z [3]|, která obsahuje stovky změřených článků a uvádí jejich reálné parametry a to včetně míry oteplení a dosažitelné kapacity v závislosti na vybíjecím proudu.

Z výše uvedeného zdroje bylo porovnáno 841 dostupných článků a to včetně novinek roku 2019. Jelikož vlastnosti baterie přímo odráží vlastnosti článků, bylo potřeba vybrat článek s kompromisem vlastností, čili kompromis mezi kapacitou a možným odebíraným výkonem (čili kompromis mezi výkonem a výdrží). Dá se říci, že pravidlem je, že čím vyšší kapacitu článek má, tím menší výkon je schopen dodat (dá se odebírat menší proud) a naopak.

Napřed byly vybrány články, které splnily požadavek na minimální kapacitu (2500mAh) a minimální vybíjecí proud (20A), čímž byly určeny hranice kompromisu mezi výkonem a výdrží a tímto prvním hrubým výběrem prošlo 92 článků.

Dále byla sestavena tabulka, ve které bylo těchto 92 článků porovnáváno z hlediska sedmi nejdůležitějších parametrů (viz tabulka 4.1). Jednotlivé parametry (kategorie) dostaly váhu podle své důležitosti. Články pak byly seřazeny podle kvality jednotlivých parametrů a byla jim přiřazena pořadí pro umístění v dané kategorii. Jednotlivá umístění ve všech kategoriích byla zprůměrována, výsledná umístění byla porovnána a články tak seřazeny podle kvality viz příloha C.1.

Napětí a maximální teplota článku mají váhu 1, protože se jedná o parametr, který má většina článků stejný nebo alespoň velice podobný, hmotnost má také váhu 1, protože její vliv je silně zakomponován v měrné energii.

Parametr	**Označení**	**Váha**
Kapacita	$C_N[mAh]$	2
Napětí	$U_N[V]$	1
Hmotnost	$m_N[g]$	1
Měrná energie	$E_M[Wh/kg]$	2
Hustota energie	$E_V[Wh/l]$	2
Maximální proud	$I_{MAX}[A]$	2
Maximální teplota	$t_{MAX}[°C]$	1

Tab. 4.1: Porovnávané parametry bateriových článků a jejich váhy

Měrná energie a hustota energie jsou parametry, které byly při výběru nejdůležitější, jelikož v sobě zahrnují kapacitu, hmotnost a rozměry článku – dávají tedy nejkomplexnější pohled na vlastnosti článku. Jelikož ale nejsou běžně udávané výrobci, bylo nutné je vypočítat (viz vzorce 4.1 a 4.2). Pro výpočet byly použity rozměry a hmotnosti článků s příslušnou tolerancí. Všechny uvedené parametry v tabulce 4.1 jsou jmenovité.

$$E_M = \frac{Q_N.U_N}{m} \quad [Wh/kg] \tag{4.1}$$

$$E_V = \frac{Q_N.U_N}{V} = \frac{Q_N.U_N}{\pi r^2 h} \quad [Wh/dm^3] \tag{4.2}$$

Tímto druhým výběrem prošlo 18 článků, mezi nimiž byly nejlépe ohodnocené články, články s jinými specifickými vlastnostmi a články, u nichž bylo vyžádáno detailnější prozkoumání (viz příloha C.1 - postupující články jsou označeny barevně).

Následovalo podrobnější porovnání parametrů. Z každého typu článku byla v tabulkách sestavena (vypočítána) provizorní baterie. Pro každý článek byla nadimenzována na maximální výkon s respektováním maximálního napětí (viz pravidla soutěže |Převzato z [1]| |Převzato z [2]|). Při sestavení článků do většího celku se více projevily rozdíly ve vlastnostech jednotlivých článků a jejich nedokonalosti a díky tomuto výběru bylo vyřazeno dalších 5 článků nejčastěji kvůli příliš vysoké hmotnosti (viz Příloha C.2). Příloha C.2 obsahuje i výpočty všech parametrů použitých v příloze C.2 a C.3.

Zbylé články byly porovnávány z hlediska dostupnosti. Jelikož většina výrobců pochází z východní Asie a tyto firmy nabízí své články většinou a jedině na neoficiálních a neověřených e-shopech, byly z těchto důvodů spojených s bezpečností a spolehlivostí články těchto výrobců vyřazeny. Také bylo třeba brát v úvahu ekonomické hledisko, tudíž byly vyřazeny příliš drahé články.

Tímto výběrem prošly pouze 4 články (Samsung INR21700-40T, Sony US18650VTC5A, Sony US18650VTC5 a Samsung INR21700-30T), mezi nimiž nebylo možné snadno rozhodnout, který má vhodnější vlastnosti pro baterii. Bylo proto zapotřebí podívat se na tvar vybíjecí charakteristiky, skutečné dosažené kapacity při daném vybíjecím proudu a míře oteplení. Data k tomuto porovnání byla čerpána ze stránky lygte-info.dk |Převzato z [3]|, kde se nachází výsledky měření porovnávaných článků. Tabulka 4.2 zobrazuje porovnání článků z hlediska tvaru vybíjecí charakteristiky a skutečné dosažené kapacity při daném vybíjecím proudu (viz Příloha C.2).

Kapacita C_N je jmenovitá kapacita, C_{VYB} je kapacita dosažená při daném vybíjecím proudu a C_K je poměr dosažené kapacity ku jmenovité. Z tabulky 4.2 je patrné, že jsou články seřazeny vzestupně podle parametru C_K, podle čehož se jako nejlepší jeví článek

Samsung INR21700-30T, který dosahuje téměř 100% své kapacity.

Při tomto porovnání byly sledovány i parametry sestavené baterie z těchto článků při různých konfiguracích pro jednotlivé vybíjecí proudy a jim odpovídajícím kapacitám. Pro konfiguraci maximálního napětí (600V) a výkonu (80kW), kdy byly tyto hodnoty nastaveny jako konstanty, bylo možno sledovat změny ostatních parametrů. Mezi nejsledovanějšími parametry bylo napětí, výkon, energie a dále hmotnost a celkový objem baterie. Z tohoto porovnání vyplynulo, že nejhorší sestavená baterie vyšla z článku Samsung INR21700-40T, sestavy ze zbylých článků byly víceméně shodné (viz příloha C.3).

Typ	$U_N[V]$	$C_N[mAh]$	$C_{VYB}[Ah]$	$C_K[\%]$	$I_{VYB}[A]$
Samsung INR21700-40T	3,6	4000	2850	**71,25**	30
			3100	**77,50**	20
			3200	**80,00**	15
Sony US18650VTC5A	3,6	2600	2250	**86,54**	30
			2300	**88,46**	20
			2400	**92,31**	15
Sony US18650VTC5	3,6	2600	2320	**89,23**	30
			2500	**96,15**	20
			2550	**98,08**	15
Samsung INR21700-30T	3,6	3000	2900	**96,67**	40
			2900	**96,67**	30
			2950	**98,33**	20
			2980	**99,33**	15

Tab. 4.2: Určení skutečné kapacity při daném vybíjecím proudu

Bateriové články jsou sice dimenzované na určité výkonové přetížení (nárůst odebíraného proudu až o 20% nad jmenovitým), ale pro tuto aplikaci jen po velice krátkou dobu (řádově stovky μs). Proto bylo třeba ověřit, jestli články zvládnou špičkový odebíraný výkon (špičkový vybíjecí proud) bez trvalého poškození, a jestli článek vydrží dlouhodobé odebírání efektivním proudem.

Tabulka 4.3 zobrazuje další konfiguraci sestavené baterie, kde byla energie baterie nastavena na potřebných 6 kWh a zároveň bylo dosaženo co nejvyššího napětí baterie. Této konfiguraci odpovídá určitý počet sériově a paralelně zapojených článků (N_S a N_P).

Kde I_{CP} (4.3) je efektivní vybíjecí proud tekoucí celou baterií (celou paralelní kombinací), I_C (4.4) je efektivní vybíjecí proud (tekoucí jedním článkem) a U_{MINK} je minimální napětí celé baterie při napětí U_{NK} jednoho článku (což je napětí článku v tzv. koleni

vybíjecí charakteristiky, což je místo na konci vybíjecího cyklu, kde začne napětí článku prudce klesat). I zde byla data brána ze stránky lygte-info.dk |Převzato z [3]|. Pro výpočet I_{CP} byla použita hodnota nejmenšího dosažitelného napětí, které způsobí nárůst odebíraného proudu, aby byl zachován konstantní výkon. Z těchto výpočtů vyplývá, že se efektivní proud odebíraný z jednoho článku pohybuje okolo 10A, článek tedy vydrží dlouhodobé namáhání.

Typ	$N_S[-]$	$N_P[-]$	$N[-]$	$E_{VYB}[kWh]$	$U_{MAX}[V]$	$I_{CP}[A]$	$I_C[A]$
Samsung INR21700-40T	115	5	570	6,01	478,8	52,40	10,48
Sony US18650VTC5A	125	6	750	6,08	525,0	47,79	7,96
Sony US18650VTC5	122	6	732	6,06	512,4	48,96	8,16
Samsung INR21700-30T	116	5	580	6,06	487,2	51,49	10,30

Tab. 4.3: Tabulka porovnání efektivních proudů pro jednotlivé články

$$I_{CP} = \frac{P_{ef}}{U_{MINK}} \quad [A] \tag{4.3}$$

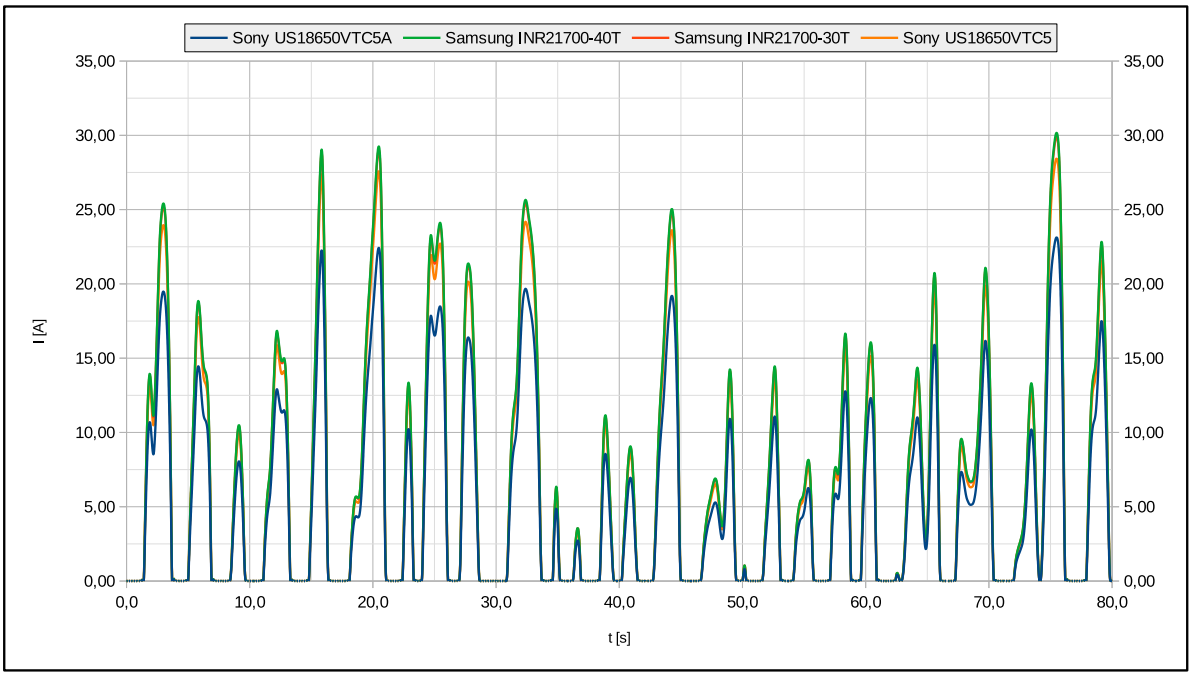
$$I_C = \frac{I_{CP}}{N_P} \quad [A] \tag{4.4}$$

Pro ověření možného přetížení článku byl použit vzorec 4.5, kde $I_C(t)$ je okamžitý odebíraný proud z článku a $P(t)$ je okamžitý výkon. Pro výpočet bylo opět použito minimální napětí a to ze stejného důvodu, jako ve vzorci 4.3 – byl uvažován nejhorší možný případ.

$$I_C(t) = \frac{P(t)}{N_P.U_{MINK}} \quad [A] \tag{4.5}$$

Obrázek 4.1 jasně ukazuje, že ani při špičkových hodnotách odebíraného proudu nedosáhne okamžitý proud maximální hodnoty jmenovitého vybíjecího proudu, tudíž by k přetížení článků nemělo dojít. Hodnoty maximálního vybíjecího proudu jednotlivých článků seřazeny v pořadí, jak ukazuje legenda: 30A, 35A, 35A a 30A.

Posledním porovnávaným parametrem byla míra oteplení jednotlivých článků, neboli jak se daný článek při daném odebíraném proudu ohřívá, z čehož vyplývá jeho chlazení. Míra oteplení znamená, o kolik stupňů se článek ohřál, proto je nutné k naměřeným hodnotám připočítat teplotu okolí, která by mohla dosahovat až 40°C.



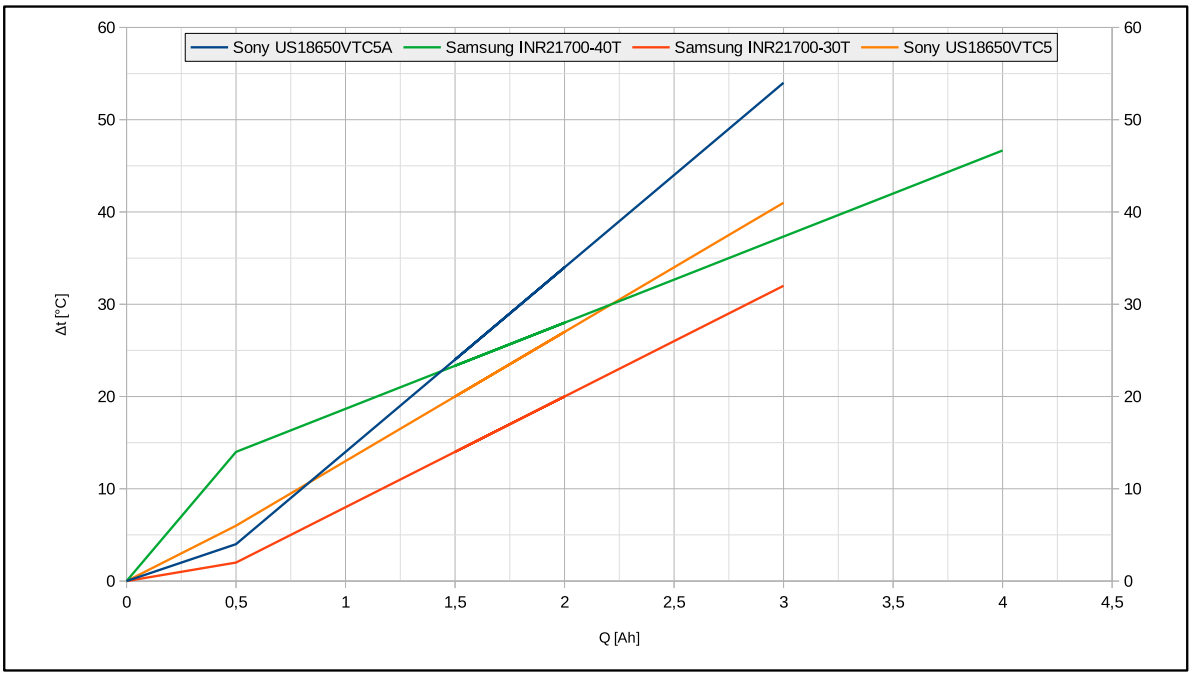
Obr. 4.1: Závislost okamžitého odebíraného proudu článků v čase

Obrázky 4.2 a 4.3 zobrazují míru oteplení v závislosti na vybíjení při daném vybíjecím proudu (data byla převzata ze stránky lygte-info.dk |Převzato z [3]|). Průběh teploty v čase při ohřívání je značně nelineární, proto byla změřená data pro účely této rešerže linearizována.

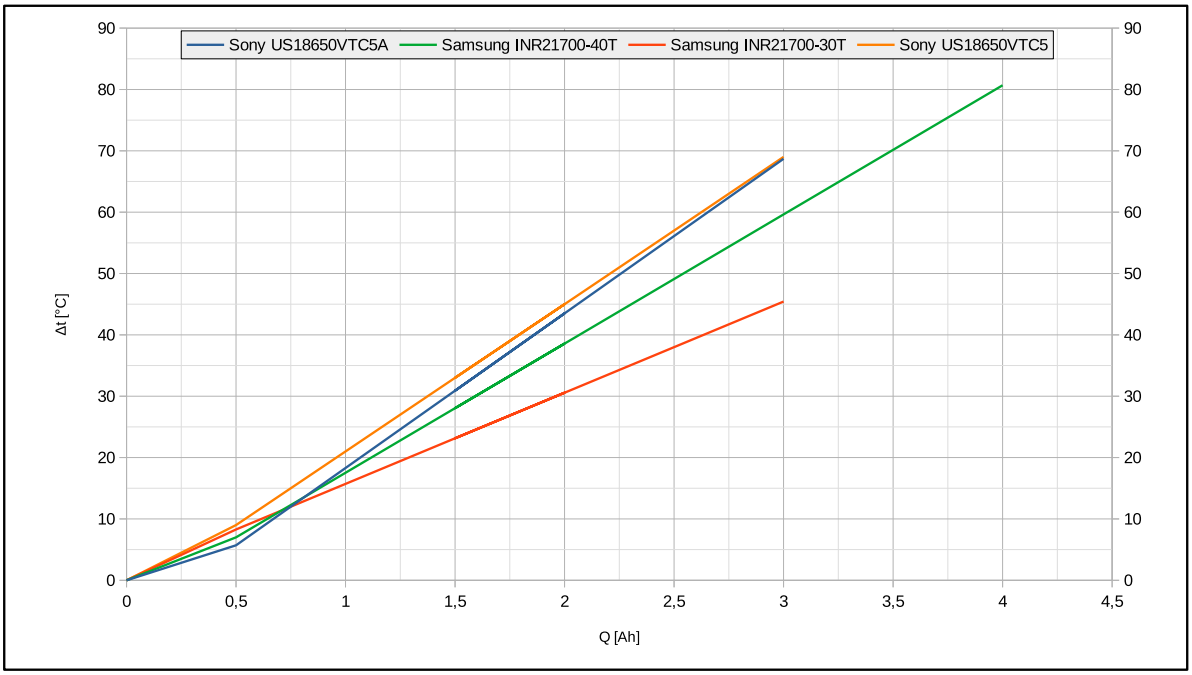
Z grafů je jasně patrné, že čím větší proud ze článku odebíráme, tím je více namáhán a tím se více výkonu přemění v teplo (více se zahřívá). Dále je patrné, že každý článek má jinak strmý nárůst teploty, a že článek s vyšší kapacitou dosáhne vyšší míry oteplení, protože je namáhán delší dobu. Což je závislé na vnitřní struktuře článku.

Nejvyšší míru oteplení má článek Samsung INR21700-40T a strmější nárůst teploty při vybíjecím proudu 30A má i článek Sony US18650VTC5A, naopak nejméně se ohřívá článek Samsung INR21700-30T.

Při vybírání vhodného článku bylo zapotřebí komplexně porovnat všechny parametry a vlastnosti všech článků s ohledem na jejich důležitost, proto byl vybrán článek **Samsung INR21700-30T**. Důvodem bylo to, že se nejméně ohřívá, je snadno dostupný a vyrábí ho spolehlivá firma, má vysoký maximální vybíjecí proud a při vybíjení vysokým proudem schopen dosáhnout téměř 100% své kapacity. Především poslední zde uvedená vlastnost tohoto článku převážila negativa jako jsou váha, velikost, nízká měrná energie a nízká hustota energie.



Obr. 4.2: Závislost oteplení na dosažené kapacitě baterie při vybíjecím proudu 15A |Převzato z [3]|



Obr. 4.3: Závislost oteplení na dosažené kapacitě baterie při vybíjecím proudu 30A |Převzato z [3]|

5

Měření základních parametrů Li-Ion článků

Důvodem provedení měření bylo ověřit základní parametry a chování vybraného článku a také zjistit závislosti a vlastnosti při známých podmínkách.

Měření bylo prováděno na dvou článcích, z nichž jeden byl nakoupen na nejmenovaném a neověřeném e-shopu (dále jen **článek B**) a druhý článek byl dodán specializovanou firmou (dále jen **článek A**). Dalším účelem měření bylo tedy i kvalitativně porovnat články z různých zdrojů.

Existuje mnoho metod pro měření vlastností akumulátorů. Tato kapitola se zabývá pouze měřeními, která jsou relevantní v daném kontextu a rozsahu práce a ani zdaleka neslouží jako metodika měření akumulátorů.

Jak je uvedeno v kapitole 2, rozsah i způsob měření musel probíhat v souladu s doporučenými nabíjecími a vybíjecími parametry článku, aby nedošlo k jeho poškození (katalogové parametry článku viz tabulka 5.1).

Parametr	Hodnota
Standard discharge capacity	3000mAh
Rated discharge capacity	2950mAh
Nominal voltage	3,6V
Standard charge	1,5A; 4,2V; 100mA cut-off
Rated charge	4A; 4,2V; 100mA cut-off
Standard charge time	130min
Max. continuous discharge	35A (at 25°C)
Discharge cut-off voltage	2,5V
Charge temperature	0-50°C (recommended <45°C)
Discharge temperature	-20-80°C (recommended <60°C)
Cell weight	69g max
Cell height	70,3mm
Cell diameter	21,22mm

Tab. 5.1: Katalogové parametry článku INR21700-30T |Převzato z [12]|

5.1 Použité měřící metody |**Převzato z [11]**|

5.1.1 Měření kapacity vybíjecí metodou

Jedná se o velice přesné, ale dlouhé měření a touto metodou lze změřit kapacitu libovolného akumulátoru. Pro určení správné kapacity je nutné, aby byl článek před začátkem měření plně nabitý a po ukončení testu musí být plně vybitý. Po ukončení testu je zapotřebí akumulátor ihned plně nabít, aby nedošlo k vnitřnímu poškození akumulátoru.

Na počátku měření je akumulátor zatížen konstantním proudem, výkonem nebo odporem. Během měření je neustále měřeno svorkové napětí a odebíraný proud (krok měření může být libovolný). Při zatěžování konstantním odporem proud v čase klesá, při zatěžování konstantním výkonem proud roste a při zatěžování konstantním proudem klesá okamžitý výkon. Při tomto testu je zapotřebí sledovat teplotu článku, protože při vybíjení jeho teplota roste a není žádoucí, aby teplota přesáhla meze udané výrobcem.

K ukončení testu dojde, jakmile klesne napětí pod definovanou mez (udaná výrobcem). V tu chvíli musí ihned dojít k odpojení zátěže. Výsledná kapacita se spočítá jako integrál proudu v čase. Při zatěžování konstantním proudem stačí vynásobit celkový čas vybíjení s hodnotou vybíjecího proudu.

Jelikož je při tomto testu zjišťována maximální kapacita uložená v akumulátoru, která se používá pro odhad SoH, je tento test stále používaný. Protože je ale článek vždy plně

vybit a dochází tak k jeho poškozování, není vhodné tento test provádět příliš často. Pokud je to ale nezbytné, doporučuje se nechávat mezi jednotlivými měřeními časovou prodlevu pro ustálení akumulátoru a to minimálně 24h po nabití.

5.1.2 Měření vnitřního odporu

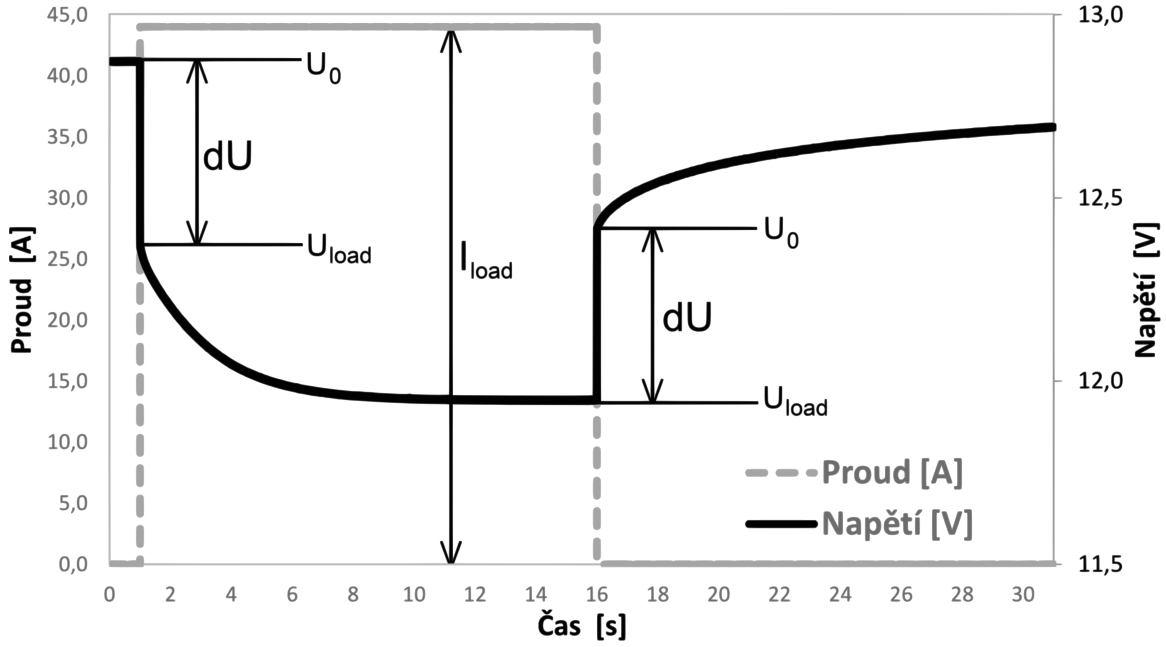
Vnitřní odpor nemá žádnou vypovídající hodnotu o kapacitě akumulátoru, slouží ale k hrubému odhadu SoH. Jelikož se ale vnitřní odpor během celé životnosti příliš nemění a až ke konci životnosti prudce roste (zejména u lithiových článků), není pro odhad SoH vhodný (v této práci slouží vnitřní odpor k určení ztrátového výkonu článku, který následně slouží k dimenzování chlazení celé baterie).

Vnitřní odpor lze změřit střídavou nebo stejnosměrnou metodou. Při měření střídavým proudem připojíme k baterii zdroj o frekvenci přibližně 100Hz (čím větší kapacita, tím nižší frekvence a naopak) a z odezvy na paralelní kombinaci R_P a C_P sériově spojené s R_S lze určit impedanci akumulátoru. Tato metoda je náročná na vyhodnocení i na měřící techniku a příliš se nepoužívá.

Stejnosměrná metoda je založená na krátkodobém zatížení akumulátoru danou hodnotou proudu (I_{LOAD}). Jedná se o velice krátký zatěžovací test, při kterém je změřeno napřed napětí naprázdno (U_{0B}) a poté napětí ihned po počátku zatížení (U_{LOAD}). Po odečtení hodnoty napětí lze test ukončit a zátěž odpojit. Hodnota odporu se vypočte podle vzorce 5.1

$$R_i = \frac{U_{0B} - U_{LOAD}}{I_{LOAD}} [\Omega] \tag{5.1}$$

kde Ri je vnitřní odpor (sériová kombinace RS a RP). Stejný efekt nastává i při odpojení zátěže (tzv. zotavení akumulátoru), můžeme tedy změřit vnitřní odpor i zde. Získané hodnoty by měly být stejné, mohou se ale lišit, proto je doporučeno provést několik testů při různých zatěžovacích proudech a vnitřní odpor poté určit jako průměr naměřených hodnot.



Obr. 5.1: Princip měření vnitřního odporu akumulátoru stejnosměrnou metodou

|Převzato z [11]|

5.2 Průběh měření

Jak je již uvedeno na začátku této kapitoly, měřené byly ty parametry, které úzce souvisí s návrhem celé baterie. Jednalo se o nabíjecí a vybíjecí charakteristiky, oteplení článku v průběhu vybíjení a nabíjení a vnitřní odpor článku. Měření průběhu nabíjení mělo význam ve smyslu kontroly nabití akumulátoru a jeho ohřevu při nabíjení (toto měření tedy sloužilo jen ke kontrole, nemělo žádnou důležitost při návrhu baterie).

Nejdůležitější část měření bylo měření vybíjení článku a jeho ohřev. Vybíjení mělo význam pro zjištění skutečné kapacity dosažené při různých vybíjecích proudech. Ohřev článku sloužil jako ukazatel pro potřebné chlazení baterie a také pro kontrolu během měření, aby článek nebyl tepelně přetěžován. Podstatnější pro dimenzování chlazení baterie bylo měření vnitřního odporu, ze kterého byl následně stanoven střední ztrátový výkon (výkon, který se při vybíjení změní na teplo, a které musí být odvedeno - chlazení).

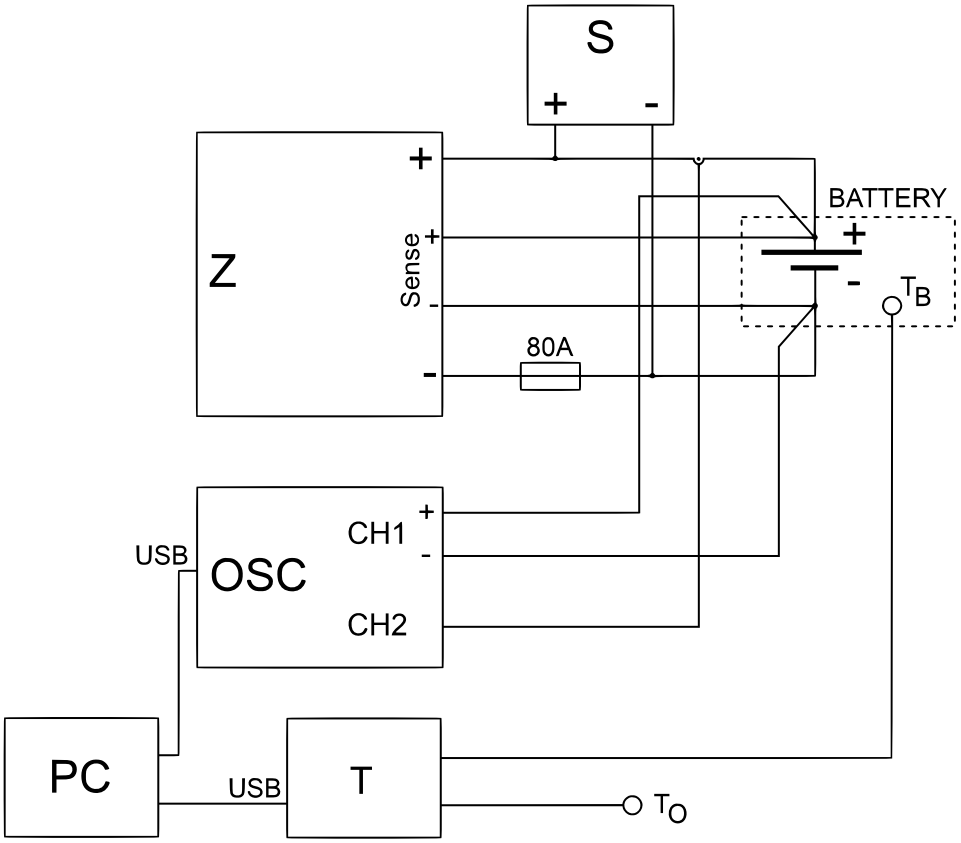
Obrázek 5.2 znázorňuje schéma zapojení při měření vnitřního odporu, nabíjení i vybíjení článku a tabulka 5.2 udává seznam použitých přístrojů, jejich parametry, evidenční číslo i označení ve schématu.

Při nabíjení byla odpojena zátěž a při vybíjení zdroj. Měřič teploty byl připojen přímo k počítači a data z osciloskopu byla ukládána na flash disk a následně uložena do počítače. Značka T_O ve schématu znázorňuje měření okolní teploty (čidlo bylo po celou dobu měření ponecháno na jednom místě tak, aby teplota okolí nebyla ovlivňována jinými přístroji

nebo například prouděním vzduchu z otevřeného okna). Čidlo snímající teplotu článku bylo přilepeno na zápornou elektrodu článku (na jeho obal - značka T_B ve schématu) a celý článek se nacházel v nehořlavém, nevýbušném a uzavřeném obalu (ve schématu označeného čárkovanou čarou).

Napětí článku a tekoucí proud obvodu byl snímán pomocí osciloskopických sond, které byly připojeny co nejblíže článku (zdroji), aby byla měřená hodnota co možná nejpřesnější. Stejně tak byly co nejblíže k článku zapojeny vývody "Sense" ze zátěže, ty slouží ke snímání napětí a jejich správným zapojením byly eliminovány ztráty přívodních kabelů. Celý obvod chránila proti zkratu 80A destruktivní pojistka.

Měření bylo provedeno tak, že první den měření bylo připraveno stanoviště, byly připraveny a zapojeny všechny přístroje a následně byly články poprvé nabity. Poté se nechaly články 24h odstát a další den byly články vybíjeny a poté ihned poté opět nabity. Pokud se při vybíjení články příliš ohřály, byly ještě před nabíjením zchlazeny. Při vybíjení byla změřena data pro určení vnitřního odporu, celkové kapacity a vybíjecích charakteristik a data pro určení, jak moc se článek ohřívá. Tento postup byl opakován. Celkem bylo provedeno 7 měření pro vybíjecí proudy 5-35A (s krokem 5A) a 8 nabití (včetně prvního).



Obr. 5.2: Schéma zapojení při měření na akumulátoru INR21700-30T

Přístroj	Typ	Ev. číslo	Označení
Digitální Osciloskop	TEKTRONIX DPO 4034B - 2,5GS/s; 350MHz	EL204 9/2011 4/8	OSC
Osciloskopická sonda – napěťová	TEKTRONIX TPP0500 - 500MHz; 300V; 3,9pF; 10M?	EL204 9/2011 4	—
Osciloskopická sonda – proudová	TEKTRONIX TCP0030A – POH003.05 – 300V	POH003.04	—
Zátež	ELECTRONIC LOAD EA-EL-9080-200 - 80V; 200A; 2,4kW; 100?	502100	Z
Měřič teploty + 3 čidla	ALMEMO 2590-2A/-4AS – AHLBORN	502135	T
Stejnosměrný zdroj	EX354RT TRIPPLE POWER SUPPLY – AimTti – 300W	241051	S
Nehořlavý obal	LIPO SAFE – ENGPOW (nehořlavý, nevýbušný) – 185x75x60mm	—	—
Pojistka	80A, 80V	—	—

Tab. 5.2: Tabulka použitých měřících přístrojů

5.3 Výsledky měření

Tabulky 5.3 a 5.4 shrnují výsledky proběhlého měření. Lze si všimnout, že teplota článku před měřením (T_B) a okolní teplota (T_O) se liší při různých měřeních o 1-2°C. Důvodem bylo, že i když se měřící stanoviště nacházelo v přízemí, kde je po celý rok stabilní teplota, je tato laboratoř velice frekventovaná a teplota byla částečně ovlivněna cirkulací vzduchu způsobenou zvýšeným pohybem osob.

V tabulkách se dále nachází změřená (C_Z) a vypočítaná (C_V) dosažená kapacita. Jako zátěž byl použit přístroj, který má přímo funkci pro vybíjení baterií, a který umí změřit dosaženou kapacitu, zaznamenává délku měření i sám ukončí měření podle požadavků. Změřená kapacita byla tudíž odečtena z tohoto přístroje a vypočítaná kapacita byla pak pro ověření změřené hodnoty vypočítaná jako vybíjecí proud přenásobený celkovou dobou trvání vybíjení (t_{VYB}). Je patrné, že se od sebe hodnoty částečně liší. To mohlo být způsobeno nepřesností měření zátěže.

Na posledním řádku tabulek je poznamenáno, jakým způsobem byl test ukončen (WET). V úvahu přichází dva možné způsoby: ukončení napětím (napětí článku klesne pod definovanou mez – článek je plně vybit) a ukončení teplotou (teplota článku přesahuje meze stanovené výrobcem a při pokračování ve vybíjení by došlo k poškození článku). Všechny testy byly ukončeny napětím, čili všechny články byly plně vybity a dosažená kapacita je tak maximálně relevantní.

Měření probíhalo i nějakou chvíli po skončení vybíjení a hodnoty teploty byly zaznamenávány z důvodu teplotní hystereze článku (i po skončení vybití teplota akumulátoru mírně rostla). To přímo odkazuje na test číslo 7, ve kterém maximální zaznamenaná teplota (T_{MAX}) překonává maximální povolenou teplotu článku o téměř 2°C, ale této teploty bylo dosaženo až po ukončení vybíjení (teplota při ukončení vybíjení byla pro oba články přibližně 78°C).

Obrázek 5.3 znázorňuje průběh nabíjení obou článků. Měřeny byly všechny nabíjecí cykly a všechny se stejnými výsledky. Na výše zmíněných obrázcích je znázorněno nabíjení po vybití 10A, protože 10A je efektivní proud tekoucí baterií.

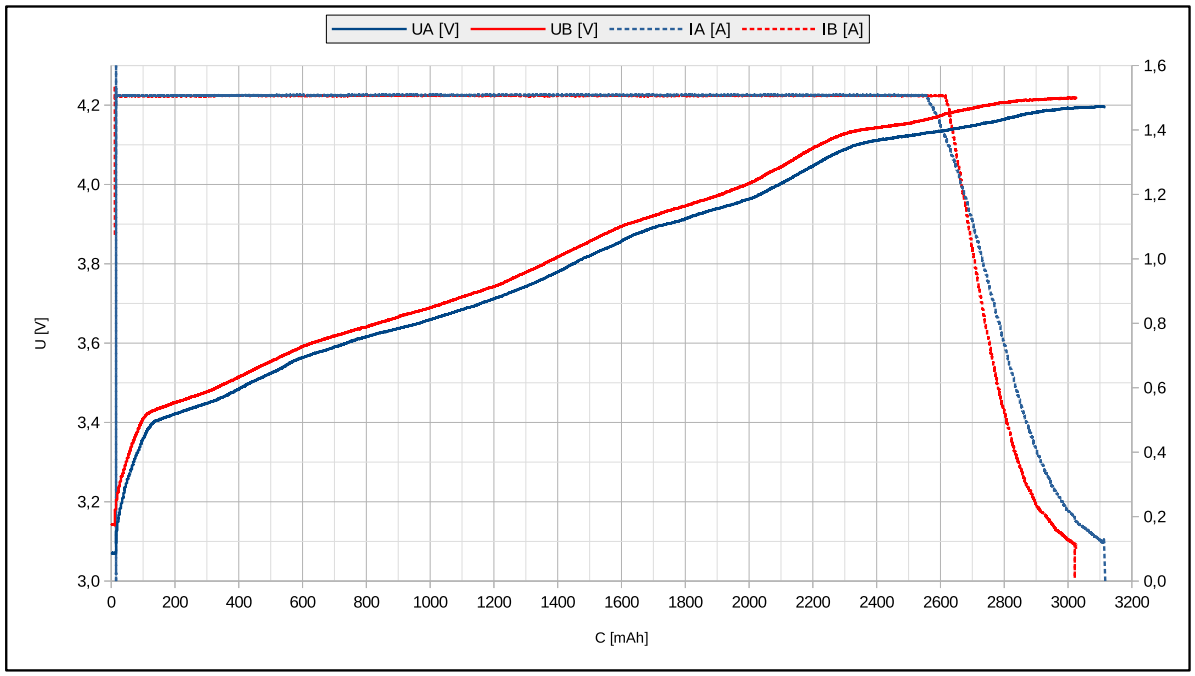
Z tabulek 5.3 a 5.4 si lze všimnout, že článek A dosáhl vždy větší kapacity, což lze dokázat i při nabíjení (obrázek 5.3). Článek A se vybil na nižší napětí než článek B, tudíž si po celou dobu nabíjení udržuje nižší okamžitou hodnotu napětí a zákonitě musí naakumulovat větší množství energie. Z toho je patrné, že článek A má větší použitelnou kapacitu.

Test číslo	1	2	3	4	5	6	7
$T_B[°C]$	24,92	25,19	24,84	24,57	25,19	24,56	24,47
$T_O[°C]$	22,65	23,06	21,84	22,20	22,14	21,62	21,98
$I_{VYB}[A]$	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**	**30**	**35**
$T_{MAX}[°C]$	32,51	42,75	50,65	59,6	67,73	75,21	81,16
$C_Z[mAh]$	**3154**	**3062**	**3098**	**3158**	**3170**	**3173**	**3174**
$C_V[mAh]$	**3156**	**3094**	**3121**	**3161**	**3174**	**3183**	**3179**
$t_{VYB}[min:s]$	37:52	18:34	12:29	09:29	07:37	06:22	05:27
WET	Napětím	Napětím	Napětím	Napětím	Napětím	Napětím	Napětím

Tab. 5.3: Shrnutí výsledků měření článku A

Test číslo	1	2	3	4	5	6	7
$T_B[°C]$	24,07	25,02	24,61	24,04	24,12	23,74	23,73
$T_O[°C]$	22,50	22,83	21,49	22,13	22,12	21,47	21,95
$I_{VYB}[A]$	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**	**30**	**35**
$T_{MAX}[°C]$	32,18	43,03	50,39	59,81	67,47	74,27	81,65
$C_Z[mAh]$	**3117**	**3054**	**3065**	**3131**	**3149**	**3154**	**3155**
$C_V[mAh]$	**3118**	**3086**	**3088**	**3133**	**3153**	**3158**	**3160**
$t_{VYB}[min:s]$	37:25	18:31	12:21	09:24	07:34	06:19	05:25
WET	Napětím	Napětím	Napětím	Napětím	Napětím	Napětím	Napětím

Tab. 5.4: Shrnutí výsledků měření článku B

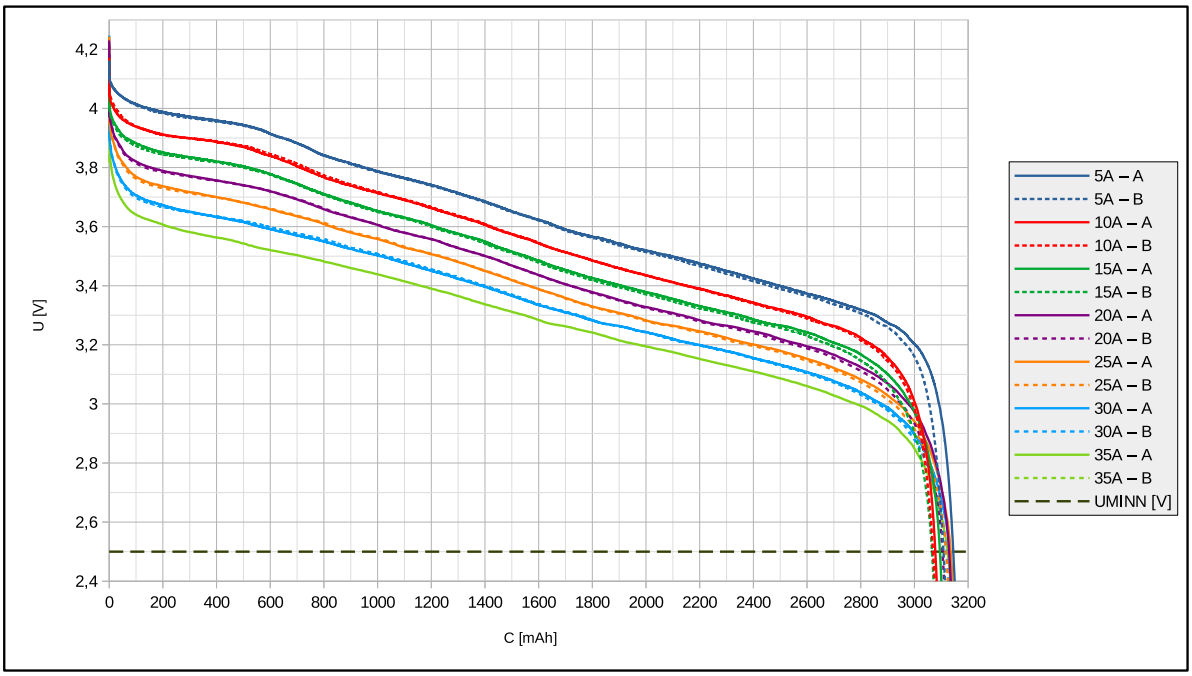


Obr. 5.3: Průběh nabíjecích charakteristik obou článků po vybíjení 10A (závislost napětí článku a nabíjecího proudu na kapacitě článku)

Dále si lze povšimnout, že průběh nabíjecího proudu není po celou dobu konstantní. Na zdroji byla nastavena hodnota nabíjecího proudu 1,5A a článek onu hodnotu odebíral po většinu času nabíjení. Jakmile článek dosáhl 87% své kapacity, začal odebíraný proud exponenciálně klesat k hodnotě 100mA, kde bylo nabíjení ukončeno.

Je důležité poznamenat, že ve chvíli, kdy začne proud klesat, mělo by být napětí na baterii konstantní a nemělo by přesáhnout 4,2V. V grafu na obrázku 5.3 je vidět, že tomu tak není. Důvodem je nezapojení vývodů "Sense" stejnosměrného zdroje při nabíjení. Napětí bylo měřeno přímo na článku, ale zdroj dodával energii i se zahrnutými úbytky na přívodních kabelech. Proto napětí na článku roste i ve chvíli, kdy by mělo být konstantní, a proto se stalo, že po některých nabitích přesáhlo napětí naprázdno nabité baterie hodnotu 4,2V. Při nabíjení se článek ohřál o 2-3°C.

Z vybíjecích charakteristik z grafu na obrázku 5.4 si lze povšimnout, že při vybíjení článků jakýmkoliv proudem bylo dosaženo vždy téměř stejné kapacity a pokaždé dosažená kapacita přesáhla kapacitu jmenovitou, což je potvrzení vlastností, které hrály důležitou roli při výběru tohoto článku (viz kapitola 4). Podstatná je také shodnost průběhů obou článků v rámci jednoho vybíjecího proudu (cyklu).



Obr. 5.4: Vybíjecí charakteristiky obou článků (závislost napětí na dosažené kapacitě pro různé vybíjecí proudy)

$I_{LOAD}[A]$	$U_0[V]$	$U_{LOAD}[V]$	$R_i[\Omega]$
5	4,16133	4,14773	**0,00272**
10	4,16992	4,10539	**0,00645**
15	4,16805	4,11578	**0,00348**
20	4,21484	4,19922	**0,00078**
25	4,24273	4,18414	**0,00234**
30	4,24578	4,17344	**0,00241**
35	4,24523	3,95820	**0,00820**

Tab. 5.5: Určování vnitřního odporu článku A

$I_{LOAD}[A]$	$U_0[V]$	$U_{LOAD}[V]$	$R_i[\Omega]$
5	4,15375	4,12805	**0,00514**
10	4,14930	4,10945	**0,00399**
15	4,17117	4,07430	**0,00646**
20	4,20875	4,15992	**0,00244**
25	4,22453	4,02789	**0,00787**
30	4,22398	3,94930	**0,00916**
35	4,22234	4,13844	**0,00240**

Tab. 5.6: Určování vnitřního odporu článku B

Určení vnitřního odporu obou článků je k nalezení v tabulkách 5.5 a 5.6. Vnitřní odpor obou článků byl určen podle vzorce 5.1 (viz kapitola 5.1.2) z každého průběhu vybíjení a to jen na počátku zatížení. Z naměřených hodnot byl vypočítán vnitřní odpor a ze všech vypočítaných vnitřních odporů poté průměrná hodnota vnitřního odporu obou článků (5.2), čímž byly eliminovány rozdíly v jeho hodnotě.

$$R_{ip} = \frac{\sum_{j=1}^{K} R_{ij}}{K} [\Omega] \tag{5.2}$$

Kde R_{ip} je průměrná hodnota odporu, R_{ij} jsou dílčí vnitřní odpory a K je počet vypočítaných hodnot. Z průměrné hodnoty vnitřního odporu a efektivní hodnoty vybíjecího proudu bylo poté možné určit střední ztrátový výkon, který se přemění v teplo, a který je nutné chladit (viz tabulka 5.7 a vzorec 5.3).

Článek	$R_{ip}[\Omega]$	$P_z[W]$
A	0,00377	0,40
B	0,00535	0,57

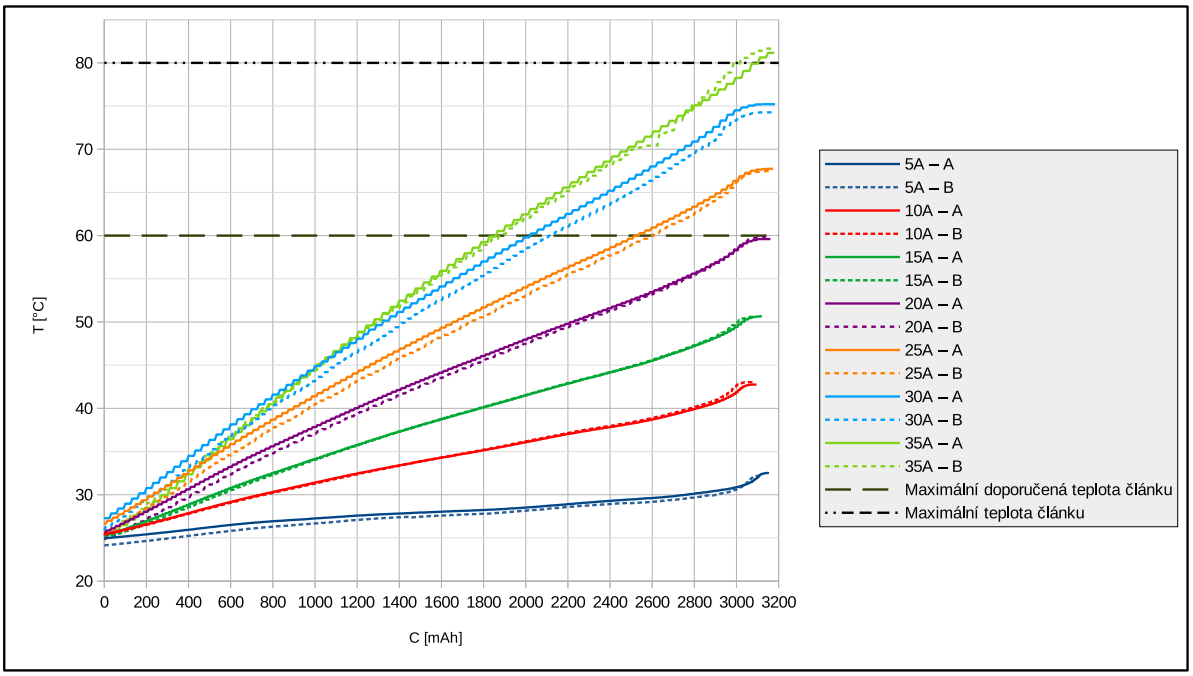
Tab. 5.7: Hodnoty průměrného vnitřního odporu a ztrátový výkon obou článků

$$P_Z = R_{ip} I_C^2 \tag{5.3}$$

Kde P_Z je ztrátový výkon a I_C je efektivní hodnota vybíjecího proudu. Z tabulky je patrné, že se hodnoty vnitřního odporu liší o $2m\Omega$, což je vzhledem k nestálosti této veličiny zanedbatelný rozdíl.

Graf níže (obrázek 5.5) zobrazuje průběh ohřívání obou článků v závislosti na dosažené kapacitě při vybíjení. Nejdůležitější bylo, že i když články nebyly chlazeny a byly uloženy v uzavřeném obalu, jejich maximální teplota nepřesáhla ani při maximálním vybíjecím proudu maximální povolenou teplotu. Dalším podstatným ukazatelem je shodnost ohřívání obou článků.

V grafu na obrázku 5.5 si lze povšimnout, že teplota článku rostla po celou dobu vybíjení konstantně, ale ke konci vybíjení došlo k prudšímu nárůstu teploty. Důvodem je, že s rostoucí teplotou a klesajícím SoC roste vnitřní odpor, což způsobuje strmější nárůst teploty ke konci vybíjecího cyklu.



Obr. 5.5: Závislost teploty obou článků při vybíjení různými proudy na dosažené kapacitě

5.4 Zhodnocení výsledků měření

Srovnáme-li články kvalitativně mezi sebou, dají se považovat za shodné. Článek A sice vykazoval schopnost akumulovat vyšší množství energie než článek B, ale pouze v řádu desítek mAh. Porovnáme-li ohřívání článků v průběhu vybíjení a hodnoty vnitřního odporu obou článků, je možné říci, že je pro oba články totožné. Dá se tedy říci, že oba zdroje dodaly rovnocenné články.

V datasheetu měřeného akumulátoru se píše, že minimální dosažená kapacita by měla být vyšší než **2950mAh**. Stránka lygte-info.dk |Převzato z [3]| zase uvádí, že při vybíjení proudem 5A by měla být dosažená kapacita **2970mAh** a při vybíjecím proudu 30A jen **2900mAh**, zatímco zde změřená dosažená kapacita se pohybovala v rozmezí **3054-3174mAh**.

V datasheetu měřeného akumulátoru není uvedeno, jak moc se článek při vybíjení nebo nabíjení ohřívá. Stránka lygte-info.dk |Převzato z [3]| uvádí, že při vybíjení proudem 15A článek ohřeje o **32°C** a při vybíjení proudem 30A se ohřeje o **45,5°C**. Zde měřené články dosahovaly oteplení při vybíjení proudem 15A **26°C** a při vybíjení proudem 30A **51°C**.

Vnitřní odpor článku vyšel přibližně $5m\Omega$ a za těchto okolností by bylo potřeba uchladit přibližně 500mW na každém článku. Pro dimenzování chlazení baterie je potřeba počítat s tím, že na konci životnosti vzroste vnitřní odpor na dvojnásobek své hodnoty oproti hodnotě na počátku životního cyklu. Vynásobíme-li původní vnitřní odpor dvěma a vezmeme-li v úvahu toleranci při měření a rezervu při dimenzování, byl výsledný vnitřní odpor stanoven na $20m\Omega$ a střední ztrátový výkon na článek bude **2,12W** (což odpovídá změřené hodnotě ze stránky lygte-info.dk).

Vnitřní odpor obou článků byl změřený na počátku vybíjecího cyklu a při pokojové teplotě článků. Závislost vnitřního odporu na teplotě a SoH je nelineární. Pro určení přesné hodnoty vnitřního odporu by bylo třeba měřit jeho hodnotu v průběhu celého vybíjení (v celé škále SoC). Článek by byl tedy střídavě zatěžován konstantní hodnotou proudu, až by se plně vybil. Tento postup by byl opakován pro různé hodnoty proudu (tudíž i teplot) a ze všech vypočítaných hodnot by byl poté určen modus nebo maximální hodnota vnitřního odporu (to by záleželo na potřebě dimenzování). Vzhledem k rozsahu práce toto měření nebylo provedeno.

Rozdíly mezi zde změřenými hodnotami a hodnotami udanými stránkou lygte-info.dk |Převzato z [3]| jsou důsledkem rozdílných podmínek a pravděpodobně i rozdílných postupů při měřeních. Proto nelze změřené hodnoty těchto dvou měření mezi sebou porovnávat. Směrodatné jsou výsledky zde popisovaného měření.

Závěrem lze tedy říci, že bude-li uvažován **efektivní vybíjecí proud** (10A), bude dosaženo kapacity přibližně **3058mAh** na článek (s touto hodnotou bude uvažováno při návrhu baterie) a každý článek se ohřeje přibližně o **18°C**. Bude-li předpokládána okolní teplota 40°C a navržené chlazení baterie, bude splněna norma maximální povolené teploty 60°C.

6

Návrh baterie

Tato kapitola popisuje a vysvětluje samotný návrh a dimenzování celé baterie. Jak je již uvedeno v úvodu, návrh baterie, jakožto i celé formule, byl podřízen pravidlům, která soutěž stanovuje. Hlavním organizátorem soutěže je organizace FSAE |Převzato z [2]|, jejíž pravidla jsou hlavní. FSG je odnož FSAE (kde bude konkrétně zde popisovaná formule závodit), tudíž pravidla stanovující FSG |Převzato z [1]| jsou buď doplňující nebo přebíjející k pravidlům FSAE, což vysvětluje případné neshody v pravidlech. Bude-li to potřeba, budou v průběhu této kapitoly citovány jednotlivé úseky pravidel, které odůvodňují jednotlivé kroky návrhu. Kompletní výčet pravidel je možný k nahlédnutí v sekci Reference, použitá literatura. |Převzato z [2]|, |Převzato z [1]| Návrh baterie byl realizován v prostředí programu Solidworks.

6.1 Požadavky na návrh

Z předchozích kapitol vyplývá, že baterie bude sestavena z akumulátorů Samsung INR21700-30T (viz obrázek 6.1) o kapacitě 3058mAh a požadovaná energie celé baterie je 6,023kWh. Před samotným návrhem baterie bylo rozhodnuto, že bude potřebná energie baterie pro jistotu navýšena na 6,5kWh.

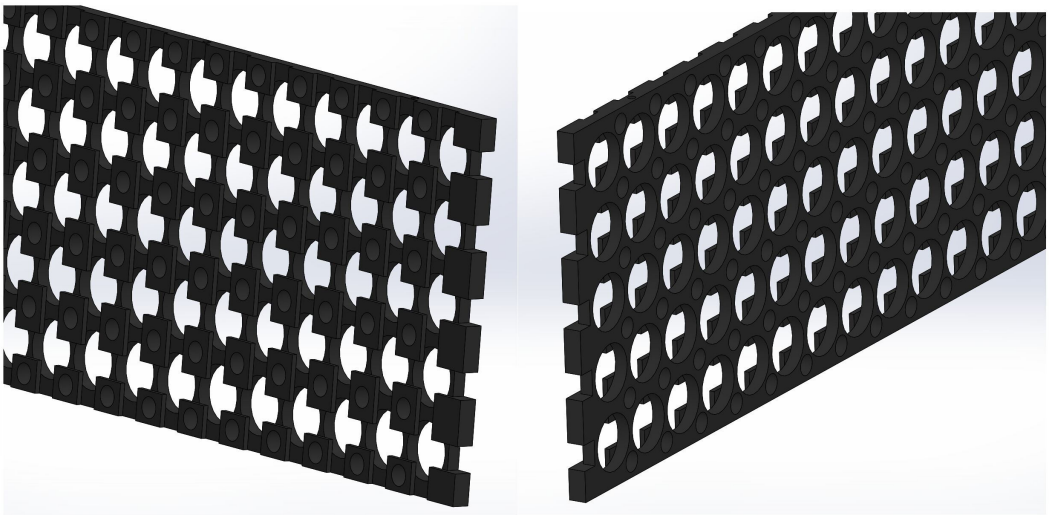
Při návrhu baterie jde především o její konfiguraci XsYp, kde Xs je počet článků zapojených do série (určuje napětí baterie) a Yp je počet článků zapojený paralelně (určuje odebíratelný proud z baterie). Jelikož ve chvíli, kdy byla baterie navrhována, byly již vybrané motory a k nim rozpracované měniče, bylo rozhodnuto, že bude konfigurace baterie podřízena návrhu měničů a motorů. Z toho vyplýval požadavek, aby napětí baterie bylo co nejvyšší a motory nemusely být odbuzovány (přetěžovány). Maximální napětí soutěž stanovuje na 600V (bráno maximální dosažitelné napětí na baterii, tudíž při nabíjení - |Převzato z [2]| oddíl EV.1.3, |Převzato z [1]| oddíl EV.4.1, EV.5). Protože je při nabíjení na akumulátoru napětí 4,2V a maximální povolené napětí je 600V, vychází maximální počet článků zapojených do série na 142. Počet paralelních článků byl poté vhodně určen tak, aby baterie splňovala požadavek na energii.

Pravidla dále stanovují, že baterie musí být rozdělena do jednotlivých segmentů a každý z nich musí mít maximální napětí 120V, energii 6MJ (1,67kWh) a váhu 12kg (|Převzato z [2]| oddíl EV.4.1 a F.10.2.2, |Převzato z [1]| oddíl EV.5.3). Zároveň musí platit, že všechny segmenty musí být identické. Vzhledem k umístění baterie ve voze (dovolenému prostoru), možné konfiguraci a požadavkům, byla baterie rozdělena do 8 segmentů. Každý segment má konfiguraci 15S5P a všechny segmenty jsou pospojovány sériově. Baterie má tedy konfiguraci **120S5P** (600 článků) o jmenovité energii **6,61kWh**, maximálním napětí **504V** a minimálním napětí **300V**.

Obr. 6.1: Článek Samsung INR21700-30T |Převzato z [3]|

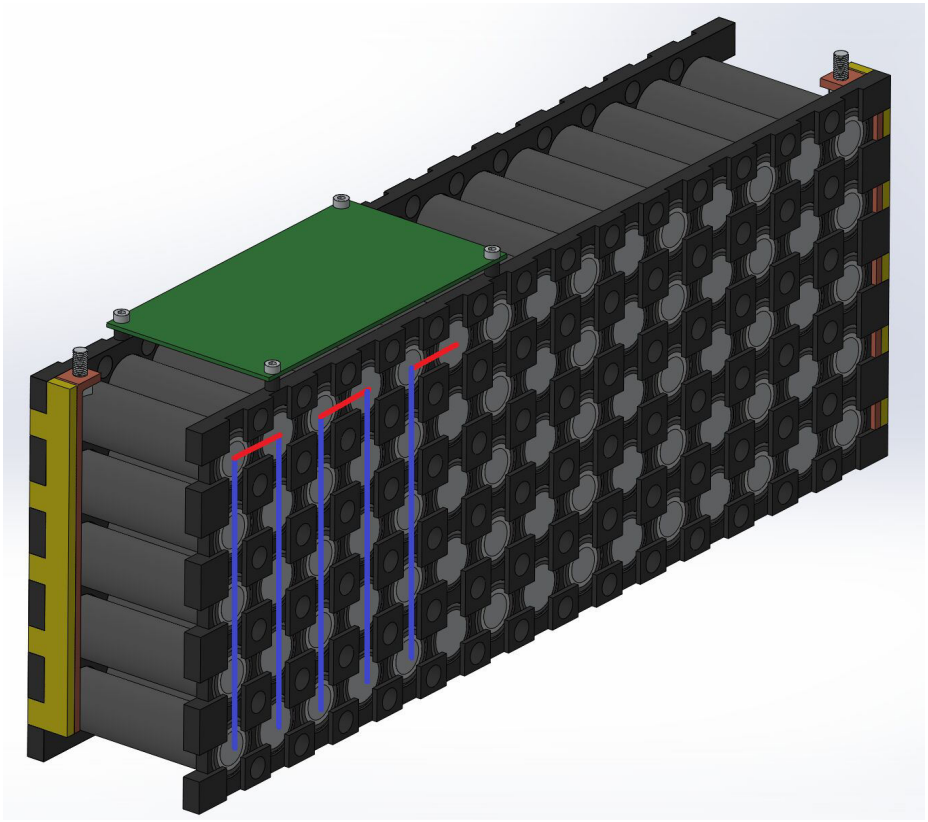
6.2 Realizace návrhu

Klíčové bylo sestavit články do segmentu. Toho bylo docíleno tak, že byla z plastové desky vyfrézovaná mřížka i s otvory pro chlazení, do které byly jednotlivé články vkládány, poté svařeny propojovacími plechy a tím segment držel pohromadě. Jako nosný materiál byl zvolen TECAPEEK HT Black a to díky nízké hustotě a díky vysoké mechanické a elektrické pevnosti (jeho vlastnosti viz |Převzato z [23]|).



Obr. 6.2: 3D model nosné mřížky článků – základ segmentu

Na obrázku 6.2 si lze povšimnout vyfrézované mřížky, do které budou uloženy jednotlivé články. Mřížka je snadno vyrobitelná a to pomocí frézy se třemi nástavci. Veliké kulaté díry slouží pro uložení článků a zbytek otvorů byl vytvořen za účelem chlazení a ubrání materiálu a tím snížení hmotnosti celého segmentu.



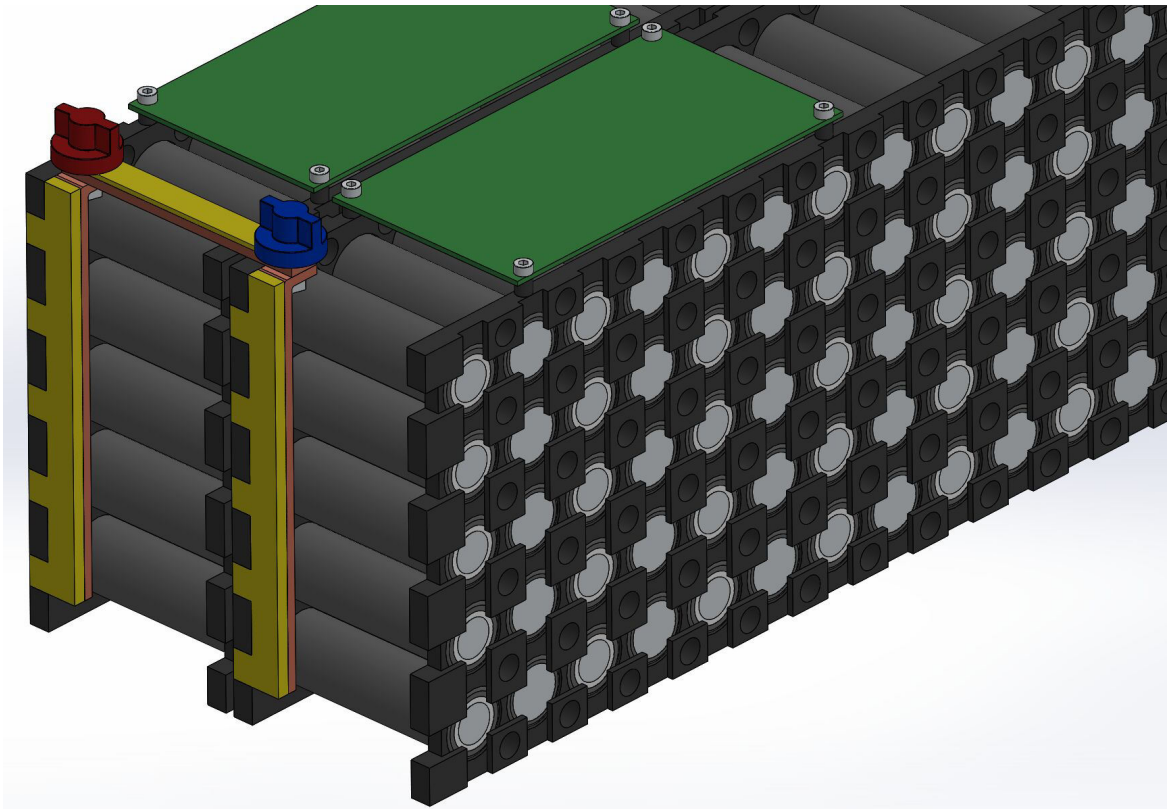
Obr. 6.3: 3D model sestaveného segmentu

Obrázek 6.3 ukazuje sestavený segment, který obsahuje dva díly mřížky a 75 článků. Celý segment drží pohromadě díky svému uložení a díky pospojování jednotlivých článků. Ty jsou spojovány vodivými plechy, které jsou na póly článků bodově navařovány a tvoří tak pevný a nerozebiratelný spoj. Paralelní spojení je docíleno svislým navařením jednoho kusu plechu přes všech 5 článků (modré čáry) a sériové spojení je realizováno střídavým horizontálním spojením dvou sousedních článků (při pohledu shora bude sériové spojení tvořit vodivý spoj ve tvaru hada - červené čáry).

Dalším podstatným problémem bylo propojení jednotlivých segmentů. To bylo realizováno pomocí měděných sběračů (oranžové desky), které byly navařeny na obě strany každého segmentu ke všem pěti paralelním článkům (viz obrázek 6.3). Na sběrači je přiložená izolace (žluté desky), aby nedošlo ke nežádoucím zkratům (jako izolační materiál byl zvolen materiál FR4).

Takto navržený sběrač má nevýhodu v nestejnorodém odebírání proudu ze článků – tzn. z horních článků bude odebírán vyšší proud než ze spodních, čímž budou články nestejnorodě vybíjeny a je možnost, že se horní články dříve opotřebují. Řešením by bylo navrhnout optimální tvar sběrače tak, aby byl ze všech článků odebírán stejný proud. To je ale vzhledem k zanedbatelnému odporu sběrače oproti odporu článků neefektivní řešení, a proto zde nebylo použito.

V horní části sběrače je umístěna plastová krytka s maticí uvnitř, která propoj zajišťuje (v pravidlech označena jako "Maintenance Plugs – MP" – |Převzato z [2]| oddíl EV.4.3, |Převzato z [1]| oddíl EV.5.4). Jednotlivé segmenty jsou propojeny dalším izolovaným měděným plechem pomocí MP a jedná se tak o šroubový spoj (červený a modrý díl viz obrázek 6.4). Tyto MP budou později vyrobeny pomocí 3D tiskárny. Červená a modrá barva označují polaritu pro vyšší přehlednost při montáži.



Obr. 6.4: 3D model realizace propojení dvou segmentů

Vedle segmentů musela baterie obsahovat i další elektroniku. Pravidla stanovují, že každá baterie musí obsahovat minimálně dva stykače neboli relé (tzv. AIRs – na každém pólu jeden), které slouží k rozpojení obvodu při poruše nebo jiné situaci (|Převzato z [2]| oddíly EV.4.2, EV.4.4, |Převzato z [1]| oddíl EV.5.6). Tyto stykače musí být typu "normally open" a pokud nedojde k jejich aktivaci, nesmí být nikde vně kontejneru baterie vysoké napětí (definice vysokého napětí tzv. HV viz |Převzato z [2]| a |Převzato z [1]| oddíl EV.1). Dále pravidla

stanovují, že baterie musí obsahovat pojistku, která chrání celou baterii. Podstatné je, že pojistka chránící baterii musí mít vypínací proud nižší než maximální vypínací proud AIRs.

Obr. 6.5: Vybraný stykač EV200 |Převzato z [17]|

Obr. 6.6: Vybraná pojistka PSR030FL0200Z |Převzato z [18]|

Co se týče elektrických požadavků na relé a pojistku, je dáno, že obě komponenty musí být dimenzované na maximální hodnoty, kterých může baterie dosahovat a musí být od segmentů a zbytku akumulátoru elektricky izolovány (přičemž vzduch nebo dostatečná vzdálenost se nepovažuje za vhodnou izolaci).

Pojistka a relé byly vybrány tak, aby splňovaly nejenom elektrické, ale i mechanické požadavky. Mezi mechanické požadavky byla považována velikost a hmotnost, protože tyto parametry byly klíčové (datasheety viz |Převzato z [17]| |Převzato z [18]|). Jako nejvhodnější stykač byl vybrán KILOVAC EV200 od firmy Tyco Electronics a pojistka byla vybrána z řady PSR od firmy POWR-SPEED Fuse a to konkrétně PSR030FL0200Z. Obě tyto komponenty budou umístěny v přední části kontejneru izolované od segmentů a přišroubovány k jeho dnu.

Dále pravidla stanovují, že každý kontejner baterie musí obsahovat LED indikátor, který singnalizuje, pokud je na baterii napětí vyšší než 60V DC. Tento indikátor musí být umístěn na stejné straně jako AIRs a musí fungovat čistě hardwarově – řízen analogově (|Převzato z [2]| oddíl EV.4.2.8, |Převzato z [1]| oddíl EV.5.4). Tento indikátor by měl být jasně vidět za jakýchkoliv (především světelných) podmínek. LED dioda bude připojená přímo k potenciálu baterie, proto byl vybrán světelný vlnovod (datasheet viz |Převzato z [19]| – obrázek Obr.7.7), který zajišťuje napěťovou izolaci, a do kterého bude svítit výkoná LED dioda, která bude vybrána v pozdějším návrhu baterie.

Obr. 6.7: Vybraný vlnovod pro signální LED diodu 1216.1005 MENTOR |Převzato z [19]|

Neméně důležitou součástí baterie je BMS (tzv. Battery Menagament System - |Převzato z [2]| oddíl EV.6, |Převzato z [1]| oddíl EV.5.8). Jedná se o zařízení, které snímá data z baterie, odesílá je do hlavního procesoru a pomáhá baterii chránit. I na tuhle komponentu se vztahují

pravidla, která říkají, co všechno musí BMS vykonávat a jak. Protože to v kontextu této práce není podstatné, nebude to dále rozebráno. Za zmínku ale stojí, že BMS musí neustále snímat teplotu a napětí a to na nejméně 30% článcích baterie. Dále je stanoveno, že měřící body musí být v baterii rovnoměrně rozložené. Měření je bodové pomocí vhodných snímačů, které budou navařeny na konkrétní pól článku a vyvedeny do BMS pomocí drátů (na kladném pólu pro měření napětí a na záporném pólu pro měření teploty). Pravidla dále stanovují, že pokud teplota alespoň jednoho článku překoná teplotu 60°C, baterie musí být okamžitě odstavena (odpojena). Dále bude baterie odpojena, pokud napětí na článcích klesne pod 2,5V (to nestanovují pravidla, je to ale doporučené výrobcem). Oba požadavky jsou z důvodu bezpečnosti a životnosti baterie.

BMS bývá zpravidla umístěna co nejblíže baterii a ani zde tomu není jinak. BMS je přímo nedílnou součástí každého segmentu. BMS je ke konstrukci segmentu připevněna pomocí distančních sloupků a šroubů. Jelikož BMS ještě není hotova a její velikost není známa, je zde uveden přibližný návrh, jak by mohla BMS vypadat a kde pro ní bude vyhrazeno místo (viz obrázek 6.3 – zelená deska).

Chlazení baterie bude zajištěno 16-ti ventilátory (2 pro každý segment). Ventilátory jsou umístěny nad sebou na jedné straně segmentu (z jedné strany vzduch nasávají a vytlačují ho skrz segment). Tyto ventilátory zatím nejsou vybrané napevno, protože nebyl dokončen model chlazení akumulátoru, takže potřebný výkon ventilátorů není znám. Bude se ale pravděpodobně jednat o běžné počítačové ventilátory vyššího výkonu rozměrově vycházející na 60x60mm (viz obrázek 6.11).

BMS a ventilátory musí být napájeny. Jsou možné dvě varianty řešení. Buď je možné tyto aktivní prvky napájet z externího zdroje (tzv. LVS = Low Voltage System viz |Převzato z [2]| oddíl EV.7, |Převzato z [1]| oddíl T.11.1) umístěného mimo hlavní baterii. Nebo je možné vytvořit napájecí zdroj přímo v kontejneru baterie, který bude brát část energie z baterie pro tyto komponenty (s touto energií bylo počítáno při dimenzování energie potřebné pro baterii – viz kapitola 3). O tom, která varianta je vhodnější, zatím není rozhodnuto. Projeví se to ale na návrhu kontejneru (otvory pro vedení kabelů k ventilátorům, prostor pro napájecí zdroj, případná změna vybraných konektorů,...).

S tím přímo souvisí výběr vhodného konektoru. Z kontejneru bude zapotřebí vyvést silovou část energie, vodiče zajišťující komunikaci mezi baterií a procesorem a případné vodiče pro napájení ventilátorů a BMS. V neposlední řadě bude potřeba konektor pro nabíjení. I to se dá realizovat více způsoby. V ideálním případě by bylo nejlepší zvolit sdružený konektor, který by měl piny pro komunikační, napájecí i silové vodiče.

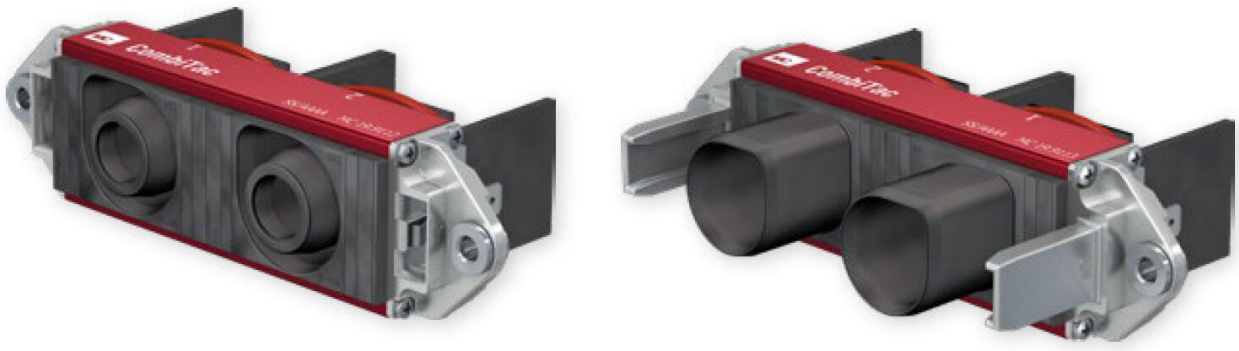
Jelikož je výběr takového konektoru poměrně složitá záležitost a takový konektor by byl značně veliký, bylo rozhodnuto pro oddělení výše popsaných částí do více konektorů. Konektor pro komunikaci byl vybrán z řady AS od firmy Deutch Autosport a sice AS007-35PA (viz obrázek 6.8 a datasheet |Převzato z [20]| |Převzato z [21]|), který je vhodný právě pro automotive aplikace. Byla zvolena varianta pro 6 pinů (nebylo bráno v úvahu napájení ventilátorů a BMS) a tento konektor je plně vodotěsný. Vzhledem k jeho velikosti nebude v budoucnu problém vybrat konektor s vyšším počtem pinů.

Obr. 6.8: Vybraný komunikační konektor AS007-35PA |Převzato z [20]| |Převzato z [21]|

Pro vedení silové části signálu byl zvolen konektor od firmy Stäubli a sice Combi-Tac CTHEB2-12 (viz obrázek 6.9 a datasheet |Převzato z [22]|), který obsahuje dva piny o průměru 12mm (jeden pro kladnou a druhý pro zápornou polaritu). Protože maximální možný odebíraný proud z baterie může být 175A, vyplývá z proudového dimenzování, že vodiče silových kabelů musí mít průřez alespoň $50mm^2$ (což odpovídá průměru 8mm).

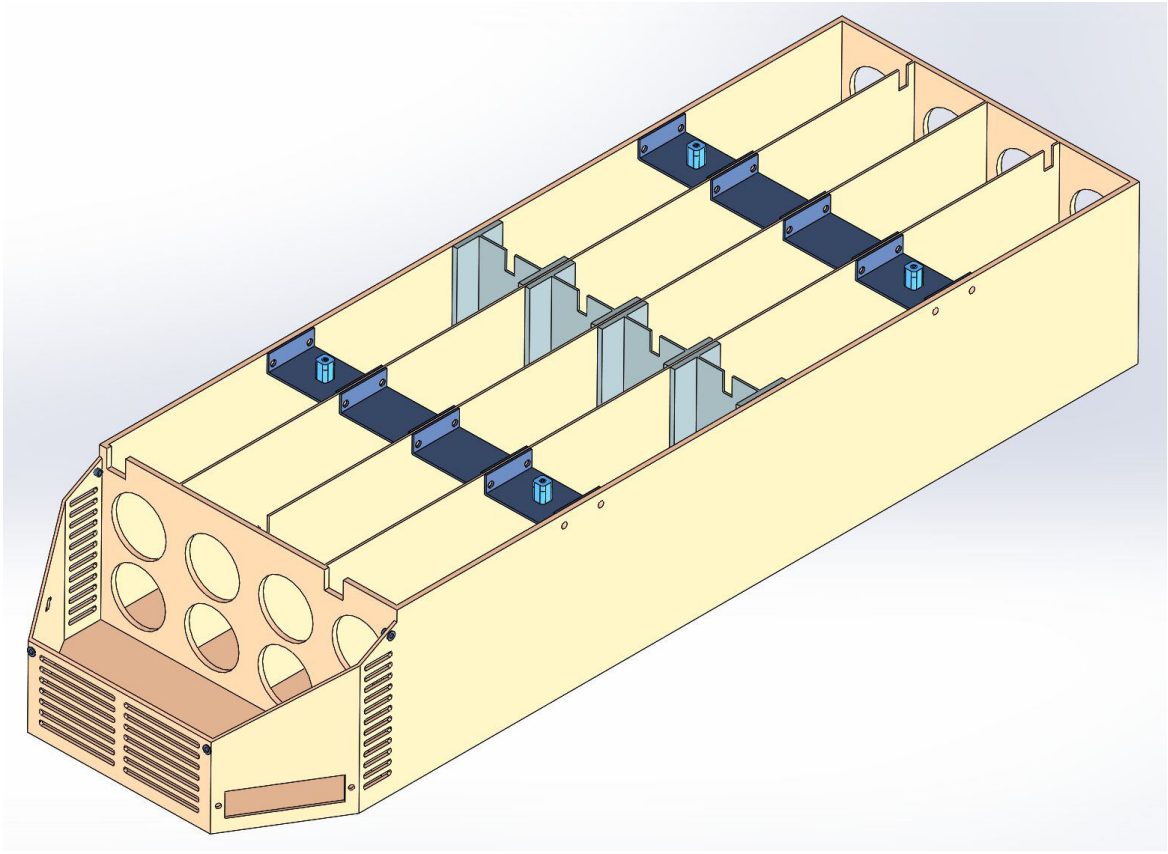
Vybraný typ je dimenzován na vysoký počet připojení/odpojení (řádově tisíce), protože se často používá jako testovací, z čehož vyplývá, že je až příliš robustní. Je potřeba zvážit i variantu, kde bude výkonový konektor obsahovat piny pro komunikaci pro tzv. "pilot line" (kontrola zapojení a izolačního stavu) – varianta CT-HEB2-12+6-1,6. |Převzato z [22]|

Všechny výše popsané součásti baterie musí být uloženy v kontejneru. Požadavky na použitý materiál, tloušťky jednotlivých stěn, dimenzování nosnosti a pevnosti, aj. jsou k nahlédnutí v pravidlech (|Převzato z [2]| oddíly EV.5, F.10, |Převzato z [1]| oddíl EV.5.5). Další podstatnou věcí je, že všechny použité spojovací prvky, které slouží k ukotvení nosné části segmentů nebo celého kontejneru patří do skupiny tzv. "kritických spojovacích prvků" a pro ně je v pravidlech speciální oddíl (|Převzato z [2]| oddíl T.8, |Převzato z [1]| oddíl T.9). Mezi tyto prvky nepatří například ukotvení ventilátorů, BMS, stykačů a pojistky.



Obr. 6.9: Vybraný výkonový konektor CTHEB2-12 |Převzato z [22]|

Jako materiál kontejneru byl zvolen kompozitní materiál (nosný materiál byl zvolen aramid a pojivo skolepoxidová pryskyřice). Tento materiál splňuje požadavky na nehořlavost a vodivost (|Převzato z [2]| oddíl EV.1.1, |Převzato z [1]| oddíl T.1.2). Celý kontejner včetně všech použitých držáků v něm a vík je z tohoto materiálu (viz obrázek 6.10).



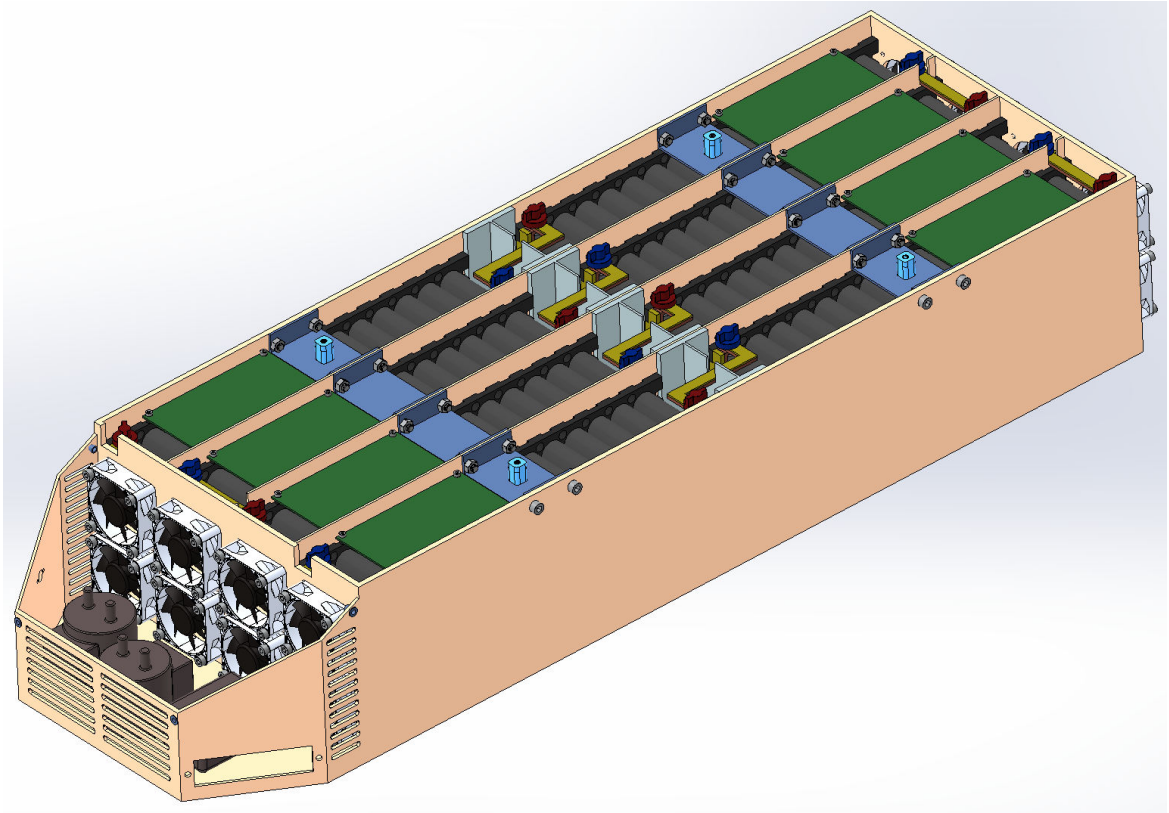
Obr. 6.10: 3D model kontejneru akumulátoru

Na obrázku 6.10 si lze povšimnout konstrukce kontejneru akumulátoru. V levé části obrázku je možné vidět perforované přední kryty akumulátoru, které slouží k nasávání vzduchu pro ventilátory. Velké kruhové otvory slouží pro umístění ventilátorů (8 v přední části a 8 v zadní části) a drobné otvory v sešikmených bocích kontejneru zase pro ko-

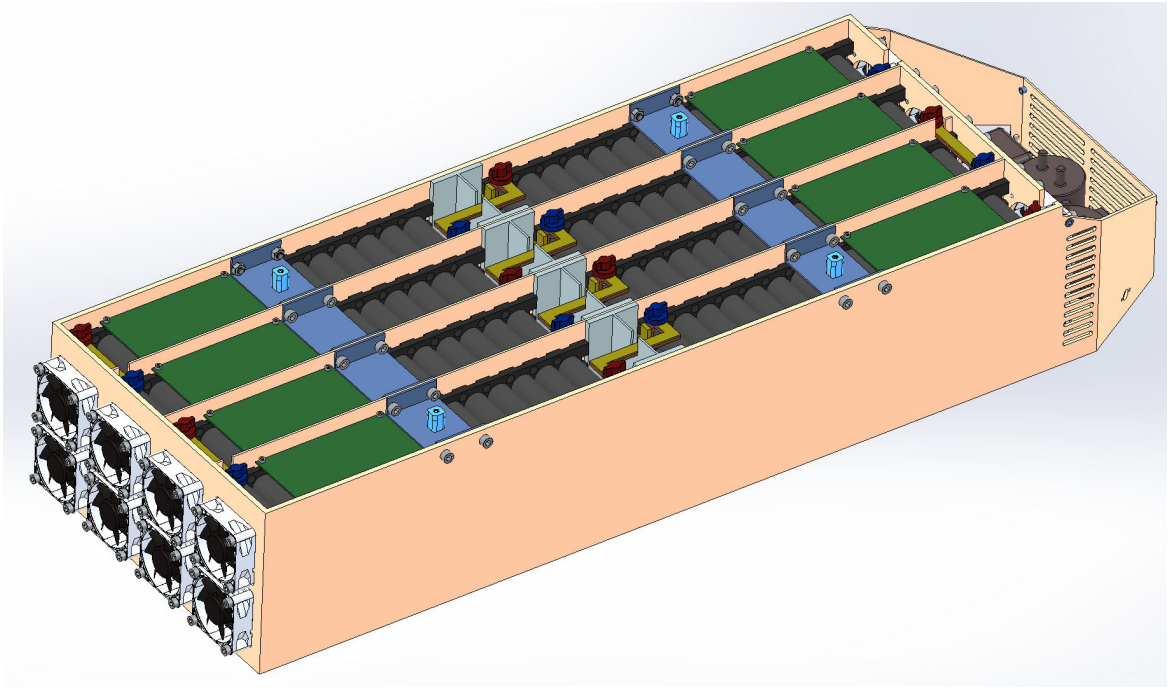
nektory (levý otvor pro komunikační a pravý pro výkonový konektor). Dalším rysem kontejneru je, že je rozdělen do dvou částí. V přední části bude umístěna výše popsaná elektronika a budou zde vedeny kabely do konektorů a v zadní části budou uloženy segmenty.

Obrázky 6.11 a 6.12 ukazují 3D model výsledné baterie, která obsahuje všechny prvky. Do kontejneru bylo umístěno a propojeno 8 segmentů, byly zde uloženy ventilátory a v přední části také stykače a pojistka, jejichž rozložení může být později jiné. Dále zde byly umístěny všechny potřebné spojovací prvky.

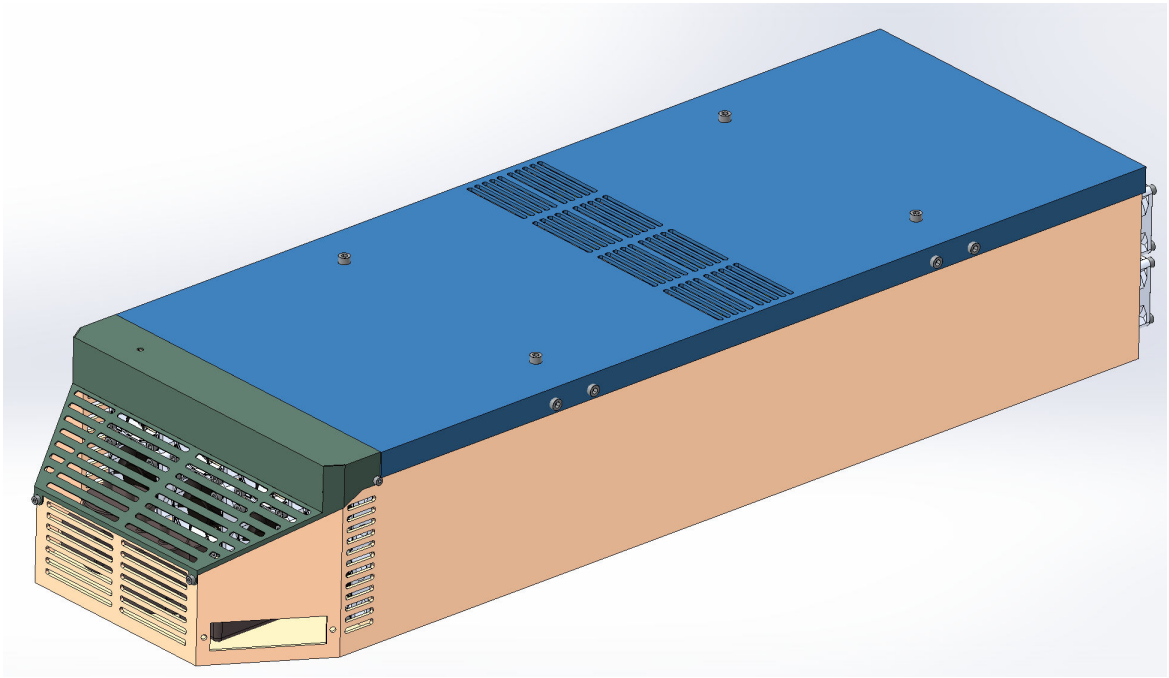
Na obrázku 6.13 je možné si povšimnout, že víka kontejneru obsahují výdechy pro ventilátory. V pravidlech je možné najít, že vozidlo bude podrobeno tzv. "zkoušce deštěm" (|Převzato z [2]|, oddíl IN.11, |Převzato z [1]| oddíl IN.9). Ta testuje vodotěsnost všech komponentů vozidla (simulace jízdy v dešti), především baterie. Z tohoto hlediska by mohly být výdechy překážkou, ale přes výdechy budou umístěny žaluzie, které se budou otevírat jen při proudění vzduchu a navíc bude kontejner ve vozidle umístěn tak, že bude proti vodě chráněn. Dále je možné vidět v předním víku malý kruhový otvor, který bude sloužit pro signální LED diodu.



Obr. 6.11: 3D model navržené baterie pohled 1



Obr. 6.12: 3D model navržené baterie pohled 2



Obr. 6.13: 3D model navržené baterie včetně vík

6.3 Shrnutí návrhu

Shrnutí návrhu baterie zobrazují tabulky 6.1 (popisuje parametry navržené baterie) a 6.2 (popisuje seznam použitých komponent v baterii). Hmotnost, objem a rozměry byly vypočítány programem Solidworks v prostředí návrhu. Pomlčky v tabulce 6.2 znamenají, že příslušné komponenty budou vybrány v pozdější fázi návrhu akumulátoru.

Parametr	Hodnota
Použitý článek	INR21700-30T
Konfigurace	120S5P
Počet článků	600
Jmenovitá energie	6,61kWh
Maximální napětí	504V
Minimální napětí	300V
Maximální vybíjecí proud	175A
Hmotnost	56,82kg
Objem	24,56dm^3
Šířka	330mm
Výška	178mm
Délka	984mm

Tab. 6.1: Parametry navrženého akumulátoru elektroformule

Součást	Typ/Materiál
Kontejner	Aramid + skloepoxid
Mřížka	TECAPEEK HT
Stykače	Kilovac EV200
Pojistka	PSR030FL0200Z
Vlnovod	1216.1005 MENTOR
LED dioda	—
Ventilátory	—
Výkonový konektro	AS007-35PA
Komunikační konektor	CTHEB2-12

Tab. 6.2: Seznam použitých elektronických komponent v akumulátoru elektroformule a jejich typy

7

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo určit energii potřebnou pro baterii elektroformule, provést rešerži bateriových Li-Ion článku, vybrat nejvhodnější typ pro baterii a změřit jeho parametry. Dále dimenzovat a navrhnout mechanickou konstrukci baterie.

Výpočet energie pro baterii elektroformule byl proveden v souladu s dostupnými daty a známými fyzikálními zákony a její hodnota byla dimenzována s dostatečnou rezervou pokrývající i případné problémy při závodu. Energie baterie byla stanovena na 6,023kWh (21,68MJ).

Rešerže bateriových Li-Ion článků byla provedena s maximálním důrazem na kvalitativní zhodnocení maximálního počtu článků. Z porovnávaných 841 článků byl vybrán jeden, který svými vlastnostmi nejvíce odpovídá požadavkům kladeným na baterii elektroformule. Na základě této rešerže bylo následně provedeno měření vybraného článku z důvodu ověření jeho vlastností a zjištění skutečných závislostí mezi jeho charakteristickými parametry. Vybrán byl článek Samsung INR21700-30T a výsledky měření dokázaly, že se jednalo o správnou volbu.

V této fázi již bylo možné navrhovat a dimenzovat samotnou baterii. Pro správný návrh mechanické konstrukce a dimenzování baterie bylo nutné napřed provést důkladnou rešerži pravidel závodu, kterým vozidlo podléhá. Před samotným návrhem byla ještě potřebná energie baterie navýšena na 6,5kWh (23,4MJ).

Poté bylo nutné navrhnout konfiguraci baterie. Elektrické vlastnosti baterie byly z části podřízeny výběrem motorů a návrhem měničů, proto se jako nejlepší a prakticky jediná přijatelná varianta jevilo rozložení článků 120S5P. Uložení jednotlivých článků do tzv. segmentů bylo realizováno pomocí mřížky z nevodivého materiálu a následného bodového navařování spojovacích plechů, což zajistilo potřebné elektrické propojení článků a také mechanickou pevnost celého segmentu. Segmentů bylo celkem 8, každý s konfigurací 15S5P a celková energie baterie se vyšplhala na 6,61kWh.

Jednotlivé segmenty musely být poté vhodně propojovány, což bude realizováno pomocí izolovaných měděných plechů, které budou navařené na segmenty a elektrické propojení bude zajišťovat šroubový spoj. Na každém segmentu se bude nacházet BMS. K celé baterii bylo nutné ještě vybrat vhodnou doplňující elektroniku (stykače, pojistku, LED indikátor, ventilátory, vhodné konektory) a vše uložit do nevodivého a mechanicky pevného kontejneru. Materiál kontejneru byl zvolen kompozit skládající se z nosné složky (aramid) a pojiva (skloepoxidová pryskyřice). Z tohoto materiálu se skládají všechny součásti kontejneru baterie a to včetně vík a nosných a podpěrných součástí.

Takto navržená baterie splňuje všechny požadavky, ale před samotnou výrobou musí baterie projít úpravami a optimalizací a bude zapotřebí vybrat zbylé komponenty baterie.

Především bude zapotřebí dokončit BMS, bez níž by baterie nebyla funkční. Dále bude zapotřebí dořešit otázku týkající se vybrání vhodných konektorů, jak je již nastíněno v předchozí kapitole (má-li být zvolen jeden společný nebo více oddělených a jaký počet pinů pro komunikaci bude zapotřebí). V této fázi ještě není dokončen matematický model chlazení baterie, takže stále ještě zbývá vybrat vhodné ventilátory a také není vybrána výkonová SMD LED dioda sloužící jako LED indikátor. S tím přímo souvisí napájení těchto aktivních prvků. První možnost je napájení těchto prvků z externí baterie a druhá varianta předpokládá v kontejneru spínaný zdroj, který odebírá část energie z baterie a napájí jí aktivní prvky. Energie baterie byla dimenzována na dostatečnou hodnotu i v případě, že by byla zvolena druhá varianta.

V neposlední řadě dojde pravděpodobně k úpravám samotného kontejneru, jelikož ještě nejsou dokončeny matematické modely a výpočty pevnosti této konstrukce i vybraného materiálu. Tyto změny se týkají maximálně tlouštěk stěn kontejneru nebo otvorů pro chlazení.

Na závěr je možné říct, že jelikož je předpokládáno, že bude formule nasazována do závodů opakovaně, bude neustále docházet k vylepšování stávající koncepce baterie (taktéž i formule). K tomu může tato práce velice dobře posloužit. Dále tato práce může sloužit jako metodika pro návrhy jiných baterií nebo jako pomocná literatura při výrobě zde navrhované baterie.

Literatura

[1] FORMULA STUDEN GERMANY. *Rules and important documents* (FS-Rules 2020 V1.0). Https://www.formulastudent.de/fsg/ [online]. Germany, 2019 [cit. 2019-10-03]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fsg/rules/.

[2] FORMULA SAE. *2020 Formula SAE Rules*. Http://fsaeonline.com/ [online]. Warrendale, PA, USA, 2019 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: http://fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx.

[3] JENSEN, Henrik K. Lygte-info. Https://lygte-info.dk/ [online]. Copenhagen, Denmark: since 2010 [cit. 2019-09-28]. Dostupné z: https://lygte-info.dk/review/batteries2012/Common18650IndividualTest%20UK.html.

[4] *FSG Magazine*. Https://www.formulastudent.de [online]. Germany: Formula Student Germany, 2019 [cit. 2019-10-10]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user˙upload/all/2019/PR˙Media/FSG2019%20magazine%20v20190724˙LQ.pdf.

[5] *FSG Magazine*. Https://www.formulastudent.de [online]. Germany: Formula Student Germany, 2018 [cit. 2019-10-10]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user˙upload/all/2018/PR˙Media/FSG2018˙magazine˙v20180725˙LQ.pdf.

[6] *FSG Magazine*. Https://www.formulastudent.de [online]. Germany: Formula Student Germany, 2017 [cit. 2019-10-10]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user˙upload/all/2017/PR/FSG2017˙magazine˙v20170726˙LQ.pdf.

[7] POKORNÝ, Vít. *Možnost akumulace elektrické energie pomocí elektrochemických baterií*. Plzeň, 2017. [cit. 2020-04-13]. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Lucie Noháčová, Ph.D.

[8] DOSTÁL, Ondřej. *Bateriový management soustavy trakčních lithiových baterií*. Plzeň, 2016. [cit. 2020-04-13]. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Jiří Flajtingr.

[9] SCHWARZ, Jaroslav. *Dimenzování trakčních baterií pro vozidla MHD*. Plzeň, 2012. [cit. 2020-04-13]. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Jiří Flajtingr.

[10] MARYT, Jan. *Systémy akumulace elektrické energie ve výkonové elektronice*. Plzeň, 2012. [cit. 2020-04-13]. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.

[11] DASTYCH, Bc. Lukáš. *Systém pro testování akumulátoru s vysokou kapacitou*. Praha, 2018. [cit. 2020-05-13]. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaroslav Roztocil, CSc.

[12] SAMSUNG SDI Confidential Proprietary [online katalogový list]. *Specification of Product INR21700-30T*. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: https://www.dnkpower.com/wp-content/uploads/2019/02/SAMSUNG-INR21700-30T-Datasheet.pdf.

[13] Results FSG 2017. Https://www.formulastudent.de [online]. Germany: Formula Student Germany, 2017 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fsg/results/2017/.

[14] Results FSG 2018. Https://www.formulastudent.de [online]. Germany: Formula Student Germany, 2018 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fsg/results/2018/.

[15] Results FSG 2019. Https://www.formulastudent.de [online]. Germany: Formula Student Germany, 2019 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: https://www.formulastudent.de/fsg/results/2019/.

[16] ZWIEFELHOFER, Jiří. *Matematický model elektrické motokáry*. Plzeň, 2014. [cit. 2020-05-13]. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Luboš Streit.

[17] TYCO ELECTRONICS [online katalogový list]. KILOVAC EV200 Series Contactor With 1 Form X Contacts Rated 500+ Amps, 12-900VDC. [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController Action=srchrtrv&DocNm=EV200˙R˙TBD˙KILOVAC˙EV200˙Ser˙Contactors&DocType=CS&DocLang=English

[18] POWR-SPEED Fuse [online katalogový list]. PSR SERIES HIGH-SPEED SQUARE BODY. [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: https://www.littelfuse.com/ /media/electrical/datasheets/fuses/semiconductor-fuseslittelfuse˙psr˙series˙high˙speed˙square˙body˙fuses˙datasheet.pdf

[19] MENTOR [online katalogový list]. 1216.1005 MENTOR. [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: https://www.tme.eu/cz/details/1216.1005/opticka-vlakna-pro-led/mentor/

[20] DEUTSCH AUTOSPORT INTERCONNECTION SOLUTIONS [online katalogový list]. AS Micro XtraLITE HE 6 Way Connector. [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: http://www.is-motorsport.com/pdfs/Deutsch˙Manuals/Interconnection˙MAY05/AS%20Micro%20HE%20Series.pdf

[21] TE CONECTIVITY [online katalogový list]. AS007-35PA. [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: https://www.te.com/global-en/product-AS007-35PA.datasheet.pdf

[22] STÄUBLI MULTI-CONTACT [online katalogový list]. Connectors for battery packs CT-HE. [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: https://spot.staubli.com/api/v1/bin/pBb1Jnj674EdBMrE2az80m?query[formats˙type]=pdf-web

[23] *Ensingerplastics* [online]. Dobřany: Ensinger, 2020 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: https://www.ensingerplastics.com/cs-cz/polotovary/plast/tecapeek-ht-black#/product-technical-detail-collapse-item-0-lvl-1

Příloha A

Legenda k tabulkám

	Jmenovité parametry
	Změřené parametry
	Vypočítané parametry
	Zvolené parametry
	Postupující články

Tab. A.1: Tabulka zobrazující významy barev v použitých tabulkách v celém dokumentu

Příloha B

Ukázka naměřených dat ze závodu z jízdy benzínové formule

$t[s]$	$s[m]$	$v[km/h]$	$v[m/s]$	$a_L[g]$	$a_L[m/s2]$	$P_{AD}[kW]$	$P_{AC}[kW]$	$P[kW]$
0,0	0,00	64,21	17,84	-0,261	-2,560	5,89	-13,24	**-7,35**
0,1	1,76	63,52	17,64	-0,271	-2,659	5,70	-13,60	**-7,90**
0,2	3,51	62,80	17,45	-0,293	-2,874	5,51	-14,54	**-9,03**
0,3	5,22	61,74	17,15	-0,332	-3,257	5,23	-16,20	**-10,96**
0,4	6,91	60,60	16,83	-0,387	-3,796	4,95	-18,53	**-13,58**
0,5	8,55	59,02	16,39	-0,460	-4,513	4,57	-21,45	**-16,88**
—	—	—	—	—	—	—	—	—
79,9	1167,79	68,90	19,14	-0,211	-2,070	7,28	-11,49	**-4,21**
80,0	1169,67	67,77	18,82	-0,268	-2,629	6,92	-14,35	**-7,43**
80,1	1171,51	66,32	18,42	-0,282	-2,766	6,49	-14,78	**-8,29**
80,2	1173,32	64,85	18,01	-0,258	-2,531	6,07	-13,22	**-7,16**
80,3	1175,10	64,22	17,84	-0,215	-2,109	5,89	-10,91	**-5,02**
80,4	1176,27	63,89	17,75	-0,189	-1,854	5,80	-9,54	**-3,74**

Tab. B.1: Výčet naměřených dat ze závodu benzínové formule použitých pro určení energie baterie (data odpovídají nejrychlejšímu kolu)

Příloha C

Tabulky z rešerže bateriových článků

C.1 Druhá selekce bateriových článků – porovnání 92 bateriových článků z hlediska jejich katalogových parametrů

Druhou selekcí bylo vyřazeno 74 článků z důvodu špatných vlastností. Zbylých 18 článků, které byly dále porovnávány jsou v tabulkách C.1, C.2, C.3 a C.4 zvýrazněny barevně (kromě EPV8245148SP).

Článek	$C_N[mAh]$	$U_N[V]$	$m_N[g]$	$E_M[Wh/kg]$	$E_V[Wh/l]$	$I_{MAX}[A]$	$t_{MAX}[°C]$	$h[mm]$	$d[mm]$	$l[mm]$
AWT IMR18650	3000	3,70	45,10	246,12	648,58	40	60	65,93	18,18	—
Vapcell IMR18650 – Red	3100	3,60	46,10	242,08	652,09	40	75	65,93	18,18	—
Eizfan IMR18650	3100	3,70	46,10	248,81	670,20	28	60	65,93	18,18	—
Nitecore IMR18650	3100	3,70	46,10	248,81	670,20	20	60	65,93	18,18	—
US18650VTC6	3130	3,60	46,50	242,32	658,40	30	60	65,93	18,18	—
TrustFire IMR18650	3000	3,70	47,10	235,67	648,58	50	60	65,93	18,18	—
Golisi IMR18650 – Gold	3000	3,70	46,10	240,78	648,58	25	60	65,93	18,18	—
Vbatty IMR18650	3000	3,70	46,90	236,67	648,58	30	60	65,93	18,18	—
Vapcell INR21700	4200	3,60	66,70	226,69	602,72	30	75	71,00	21,21	—
Vapcell INR21700 – Red	4500	3,60	71,30	227,21	645,77	20	75	71,00	21,21	—
Enercig 18650 – Green	3000	3,60	47,20	228,81	631,05	25	60	65,93	18,18	—
INR18650 HG2	3000	3,60	47,00	229,79	631,05	20	45	65,93	18,18	—
Golisi IMR18650	3000	3,70	51,00	217,65	648,58	35	60	65,93	18,18	—
US18650VTC6A	3000	3,60	48,00	225,00	631,05	30	60	65,93	18,18	—
US21700VTC6A	4200	3,60	69,00	219,13	602,72	30	60	71,00	21,21	—
AWT IMR18650 – Yellow	2600	3,70	44,40	216,67	562,11	35	60	65,93	18,18	—
US18650VTC5D	2800	3,60	46,37	217,38	588,98	25	90	65,93	18,18	—
18650HG2	3000	3,60	49,00	220,41	631,05	20	60	65,93	18,18	—
TrustFire IMR21700	4000	3,70	69,50	212,95	589,96	40	60	71,00	21,21	—
IMR 18650 V1	2600	3,70	44,40	216,67	562,11	25	75	65,93	18,18	—
IMR 21700 V1	4000	3,70	69,00	214,49	589,96	30	75	71,00	21,21	—
Samsung INR21700-40T	4000	3,60	67,00	214,93	573,20	35	80	71,10	21,21	—
Sony US18650VTC5A	2600	3,60	47,10	198,73	546,91	30	60	65,93	18,18	—

Tab. C.1: Výsledky první selekce a porovnání 92 článků z hlediska jejich katalogových parametrů (články seřazeny sestupně podle umístění - 1-23)

Článek	$C_N[mAh]$	$U_N[V]$	$m_N[g]$	$E_M[Wh/kg]$	$E_V[Wh/l]$	$I_{MAX}[A]$	$t_{MAX}[°C]$	$h[mm]$	$d[mm]$	$l[mm]$
Vapcell INR18650	2800	3,60	46,90	214,93	588,98	25	60	65,93	18,18	—
Golisi IMR18650	2600	3,70	45,70	210,50	562,11	35	60	65,93	18,18	—
Sony US18650VTC5	2600	3,60	44,30	211,29	546,91	30	60	65,93	18,18	—
XHData 18650	2500	3,70	43,90	210,71	540,49	35	60	65,93	18,18	—
INR21700-40T	4000	3,60	69,00	208,70	574,02	35	60	71,00	21,21	—
QB26800	6800	3,70	116,50	215,97	572,50	30	60	81,14	26,26	—
INR21700H40	4000	3,60	69,00	208,70	574,02	30	60	71,00	21,21	—
EPV8245148SP	6800	3,85	118,00	221,86	485,30	102	60	148,00	45,00	8,10
Eizfan 18650 – Black	2600	3,70	46,00	209,13	562,11	25	60	65,93	18,18	—
Enercig 18650 – Gray	2600	3,60	45,00	208,00	546,91	31	60	65,93	18,18	—
AK2050 18650	2500	3,70	45,00	205,56	540,49	35	45	65,93	18,18	—
Ampsplus INR18650	2500	3,65	43,80	208,33	533,18	20	60	65,93	18,18	—
IMR 18650 V1	3000	3,70	55,00	201,82	648,58	20	75	65,93	18,18	—
INR18650-25R	2600	3,60	45,00	208,00	546,91	20	60	65,93	18,18	—
AK3526 18650	2600	3,60	46,00	203,48	546,91	35	60	65,93	18,18	—
Molicel INR18650-P26A	2600	3,60	46,00	203,48	546,91	35	60	65,93	18,18	—
Sanyo UR18650NSX	2600	3,60	45,40	206,17	546,91	22	60	65,93	18,18	—
IMR 26650 V1	3100	3,70	49,00	234,08	321,22	30	75	65,93	26,26	—
Eizfan IMR18650	2500	3,70	45,20	204,65	540,49	25	75	65,93	18,18	—
Apexium INR18650	2600	3,60	46,00	203,48	546,91	25	60	65,93	18,18	—
UR18650NSX	2600	3,60	45,80	204,37	546,91	20	60	65,93	18,18	—
UR18650NSX	2600	3,60	45,80	204,37	546,91	20	60	65,93	18,18	—
Keeppower IMR18650	2600	3,70	48,50	198,35	562,11	35	60	65,93	18,18	—

Tab. C.2: Výsledky první selekce a porovnání 92 článků z hlediska jejich katalogových parametrů (články seřazeny sestupně podle umístění - 24-46)

Článek	$C_N[mAh]$	$U_N[V]$	$m_N[g]$	$E_M[Wh/kg]$	$E_V[Wh/l]$	$I_{MAX}[A]$	$t_{MAX}[°C]$	$h[mm]$	$d[mm]$	$l[mm]$
21700 IJOY	3750	3,70	70,00	198,21	553,09	40	60	71,00	21,21	—
Samsung INR18650-25S	2500	3,60	44,90	200,45	525,88	25	80	65,93	18,18	—
Ebat 18650 E7-18P25	2500	3,70	46,20	200,22	540,49	20	60	65,93	18,18	—
Vapcell INR18650	2600	3,60	48,00	195,00	546,91	25	75	65,93	18,18	—
EFEST IMR 26650	5000	3,70	94,80	195,15	518,10	45	75	65,93	26,26	—
Eizfan IMR20700	3100	3,70	56,90	201,58	504,09	30	60	71,00	20,20	—
Vapcell INR18650	2600	3,60	48,50	192,99	546,91	20	70	65,93	18,18	—
Eizfan IMR21700	3750	3,70	72,20	192,17	553,09	30	60	71,00	21,21	—
Golisi IMR20700 S32	3200	3,70	61,50	192,52	520,35	30	60	71,00	20,20	—
NCR20650A	3100	3,60	58,00	192,41	528,19	30	60	65,93	20,20	—
IMR 21700 V1	3700	3,70	73,00	187,53	545,72	35	75	71,00	21,21	—
NCR20700A	3300	3,60	60,00	198,00	522,11	30	60	71,00	20,20	—
Ebat 26650 E7-26P50	5000	3,70	96,00	192,71	518,10	25	60	65,93	26,26	—
QB26650	5000	3,70	96,00	192,71	518,10	20	60	65,93	26,26	—
IMR 18650 V1	2600	3,70	55,00	174,91	562,11	25	75	65,93	18,18	—
Shockli 20700	3200	3,70	62,50	189,44	520,35	30	60	71,00	20,20	—
18650HE4	2500	3,60	48,00	187,50	525,88	30	60	65,93	18,18	—
Vapcell INR21700	3750	3,60	74,30	181,70	538,14	30	75	71,00	21,21	—
Ebat 20700 E7-20P30	3000	3,70	58,00	191,38	487,83	30	60	71,00	20,20	—
18650HE2	2500	3,60	48,00	187,50	525,88	20	60	65,93	18,18	—
INR20650HG6	3000	3,60	58,00	186,21	511,15	30	75	65,93	20,20	—
Efest IMR20700	3100	3,70	61,80	185,60	504,09	30	75	71,00	20,20	—
Apexium INR20700	3000	3,60	57,30	188,48	474,64	30	60	71,00	20,20	—

Tab. C.3: Výsledky první selekce a porovnání 92 článků z hlediska jejich katalogových parametrů (články seřazeny sestupně podle umístění - 47-69)

Článek	$C_N[mAh]$	$U_N[V]$	$m_N[g]$	$E_M[Wh/kg]$	$E_V[Wh/l]$	$I_{MAX}[A]$	$t_{MAX}[°C]$	$h[mm]$	$d[mm]$	$l[mm]$
AK3030 20700	3000	3,70	60,00	185,00	487,83	35	45	71,00	20,20	—
Vapcell INR20700	3100	3,60	63,00	177,14	490,46	30	75	71,00	20,20	—
US18650VTC4	2100	3,70	45,00	172,67	454,01	30	60	65,93	18,18	—
IMR 26650 V1	3000	3,70	57,80	192,04	310,86	30	75	65,93	26,26	—
QB20700	3000	3,60	63,00	171,43	474,64	30	60	71,00	20,20	—
IMR 26650 V1	4200	3,70	91,20	170,39	435,20	35	75	65,93	26,26	—
TrustFire IMR26650	4200	3,70	91,50	169,84	435,20	45	60	65,93	26,26	—
Vapcell IMR26650	4200	3,60	90,00	168,00	423,44	45	75	65,93	26,26	—
GOLISI IMR26650	4300	3,70	99,00	160,71	445,57	35	60	65,93	26,26	—
QB20650	2600	3,70	58,00	165,86	455,31	25	60	65,93	20,20	—
Vapcell INR21700	3100	3,60	68,40	163,16	444,87	35	70	71,00	21,21	—
Vapcell INR20700	3000	3,60	67,30	160,48	474,64	30	75	71,00	20,20	—
Samsung INR21700-30T	3000	3,60	68,10	158,59	430,51	35	80	71,00	21,21	—
Vapcell INR21700	3000	3,70	70,90	156,56	442,47	36	75	71,00	21,21	—
30T 21700	3000	3,60	69,00	156,52	430,51	35	60	71,00	21,21	—
INR21700-30T	3000	3,60	69,00	156,52	430,51	35	60	71,00	21,21	—
IMR 26650 V1	3500	3,70	86,00	150,58	362,67	32	75	65,93	26,26	—
INR21700HB3	3000	3,60	69,00	156,52	430,51	30	60	71,00	21,21	—
Windyfire IMR26650	3500	3,70	86,50	149,71	362,67	30	60	65,93	26,26	—
AK4030 21700	3000	3,60	100,00	108,00	430,51	35	80	71,00	21,21	—
ANR26650	2400	3,30	76,00	104,21	221,80	70	55	65,93	26,26	—
A123 ANR26650M1A	2300	3,30	75,60	100,40	212,56	70	60	65,93	26,26	—
Efest IMR26650 – Red	3000	3,80	91,40	124,73	319,26	15	60	65,93	26,26	—

Tab. C.4: Výsledky první selekce a porovnání 92 článků z hlediska jejich katalogových parametrů (články seřazeny sestupně podle umístění - 70-92)

C.2 Třetí selekce bateriových článků – porovnání 18 bateriových článků (detailnější pohled na parametry článků pro sestavené provizorní baterie

Třetí selekcí, která zahrnovala detailnější porovnání parametrů pro provizorně sestavených bateriích a porovnání dostupnosti a ceny bylo vyřazeno 14 článků (zbyly Samsung INR21700-40T, Sony US18650VTC5A, Sony US18650VTC5 a Samsung INR21700-30T). Níže uvedené vzorce (C.1 až C.11) slouží k určení hodnot tabulek C.5 C.6 C.7 a C.8 (nejsou zde uvedené vzorce, které již byly uvedeny dříve. Kde U_{NMAX} je maximální hodnota napětí akumulátoru (u lithiových akumulátorů se standardně jedná o hodnotu 4,2V).

$$C_P = \frac{C_{VYB}}{C_N}.100[\%] \tag{C.1}$$

$$N = N_S.N_P[-] \tag{C.2}$$

$$M = N.m_N[kg] \tag{C.3}$$

$$V - \frac{d^2.\pi.h.N}{4}[dm^3] \tag{C.4}$$

$$U = U_N.N_S[V] \tag{C.5}$$

$$U_{MINK} = U_{NK}.N_S[V] \tag{C.6}$$

$$U_{MAX} = U_{NMAX}.N_S[V] \tag{C.7}$$

$$E_{VYB} = N.U_N.C_{VYB}[kWh] \tag{C.8}$$

$$E_B = N.U_N.C_N[kWh] \tag{C.9}$$

$$P_{MINB} = I_{VYB}.N_P.U_{MINK}[kW] \tag{C.10}$$

$$P_B = I_{VYB}.N_P.U[kW] \tag{C.11}$$

Typ	$U_N[V]$	$U_{NMIN}[V]$	$C_N[mAh]$	$m_N[g]$	$h[mm]$	$d[mm]$	$I_{VYB}[A]$	$N_S[-]$	$N_P[-]$	$N[-]$	$M[kg]$
AWT IMR18650	3,7	2,5	3000	45,1	65,2	18,5	40	**108**	**5**	540	**24,35**
Vapcell IMR18650 – Red	3,6	2,5	3100	46,1	65,2	18,5	40	**111**	**5**	555	**25,59**
Eizfan IMR18650	3,7	2,5	3100	46,1	65,2	18,5	28	**128**	**6**	768	**35,40**
Nitecore IMR18650	3,7	2,5	3100	46,1	65,2	18,5	20	**135**	**8**	1080	**49,79**
US18650VTC6	3,6	2,5	3130	46,5	65,2	18,5	30	**123**	**6**	738	**34,32**
Samsung INR21700-40T	3,6	2,5	4000	67,0	71,1	21,2	35	**126**	**5**	630	**42,21**
Sony US18650VTC5A	3,6	2,5	2600	47,9	65,9	18,18	30	**142**	**5**	710	**34,01**
Sony US18650VTC5	3,6	2,5	2600	44,3	65,0	18,2	30	**123**	**6**	738	**32,69**
Eizfan 18650 – Black	3,7	2,5	2600	46,0	64,9	18,3	25	**142**	**6**	852	**39,19**
Enercig 18650 – Gray	3,6	2,5	2600	45,0	65,1	18,3	31	**142**	**5**	710	**31,95**
Golisi IMR20700 S32	3,7	2,5	3200	61,5	70,0	20,6	30	**142**	**5**	710	**43,67**
Ebat 20700 E7-20P30	3,7	2,5	3000	58,0	70,2	20,6	30	**120**	**6**	720	**41,76**
Apexium INR20700	3,6	2,5	3000	57,3	70,0	20,4	30	**123**	**6**	738	**42,29**
Vapcell IMR26650	3,6	2,5	4200	90,0	66,0	26,4	45	**123**	**4**	492	**44,28**
Vapcell INR21700	3,6	2,5	3100	68,4	70,2	21,2	35	**126**	**5**	630	**43,09**
Samsung INR21700-30T	3,6	2,5	3000	68,1	70,1	21,0	35	**126**	**5**	630	**42,90**
Windyfire IMR26650	3,7	2,5	3500	86,5	66,3	26,2	30	**142**	**5**	710	**61,42**
Efest IMR26650 – Red	3,8	2,5	3000	91,4	66,4	26,5	15	**140**	**10**	1400	**127,96**

Tab. C.5: Sestavené provizorní baterie pro detailnější porovnání článků část 1

Typ	$V[dm3]$	$U[V]$	$U_{MIN}[V]$	$U_{MAX}[V]$	$E_B[kWh]$	$E_G[Wh/kg]$	$P_{GB}[kW/kg]$	$P_{MINB}[kW]$	$P_B[kW]$
AWT IMR18650	12,05	399,60	270,00	**453,60**	**5,99**	246,12	3,28	**54,00**	79,92
Vapcell IMR18650 – Red	12,38	399,60	277,50	**466,20**	**6,19**	242,08	3,12	**55,50**	79,92
Eizfan IMR18650	17,14	473,60	320,00	**537,60**	**8,81**	248,81	2,25	**53,76**	79,56
Nitecore IMR18650	24,10	499,50	337,50	**567,00**	**12,39**	248,81	1,61	**54,00**	79,92
US18650VTC6	16,47	442,80	307,50	**516,60**	**8,32**	242,32	2,32	**55,35**	79,70
Samsung INR21700-40T	20,15	453,60	315,00	**529,20**	**9,07**	214,93	1,88	**55,13**	79,38
Sony US18650VTC5A	15,47	511,20	355,00	**596,40**	**6,65**	195,41	2,25	**53,25**	76,68
Sony US18650VTC5	15,89	442,80	307,50	**516,60**	**6,91**	211,29	2,44	**55,35**	79,70
Eizfan 18650 – Black	18,52	525,40	355,00	**596,40**	**8,20**	209,13	2,01	**53,25**	78,81
Enercig 18650 – Gray	15,48	511,20	355,00	**596,40**	**6,65**	208,00	2,48	**55,03**	79,24
Golisi IMR20700 S32	21,09	525,40	355,00	**596,40**	**8,41**	192,52	1,80	**53,25**	78,81
Ebat 20700 E7-20P30	21,45	444,00	300,00	**504,00**	**7,99**	191,38	1,91	**54,00**	79,92
Apexium INR20700	21,50	442,80	307,50	**516,60**	**7,97**	188,48	1,88	**55,35**	79,70
Vapcell IMR26650	22,63	442,80	307,50	**516,60**	**7,44**	168,00	1,80	**55,35**	79,70
Vapcell INR21700	19,88	453,60	315,00	**529,20**	**7,03**	163,16	1,84	**55,13**	79,38
Samsung INR21700-30T	19,48	453,60	315,00	**529,20**	**6,80**	158,59	1,85	**55,13**	79,38
Windyfire IMR26650	32,31	525,40	355,00	**596,40**	**9,19**	149,71	1,28	**53,25**	78,81
Efest IMR26650 – Red	65,28	532,00	350,00	**588,00**	**15,96**	124,73	0,62	**52,50**	79,80

Tab. C.6: Sestavené provizorní baterie pro detailnější porovnání článků část 2

C.3 Porovnání provizorních baterií sestavených ze 4 porovnávaných článků

Data převzata ze zdroje stránky lygte-info.dk |Převzato z [3]|.

Typ	$U_N[V]$	$U_{NMIN}[V]$	$U_{NK}[V]$	$C_N[mAh]$	$C_{VYB}[Ah]$	$C_P[\%]$	$I_{VYB}[A]$	$N_S[-]$	$N_P[-]$	$N[-]$
Samsung INR21700-40T	3,6	2,5	3,00	4000	2850	**71,25**	30	142	5	710
			3,00		3100	**77,50**	20	138	8	1104
			3,00		3200	**80,00**	15	134	11	1474
Sony US18650VTC5A	3,6	2,5	3,00	2600	2250	**86,54**	30	142	5	710
			3,10		2300	**88,46**	20	138	8	1104
			3,10		2400	**92,31**	15	134	11	1474
Sony US18650VTC5	3,6	2,5	2,90	2600	2320	**89,23**	30	142	5	710
			3,00		2500	**96,15**	20	135	8	1080
			3,00		2550	**98,08**	15	142	10	1420
Samsung INR21700-30T	3,6	2,5	3,00	3000	2900	**96,67**	40	134	4	536
			3,10		2900	**96,67**	30	142	5	710
			3,18		2950	**98,33**	20	135	8	1080
			3,20		2980	**99,33**	15	142	10	1420

Tab. C.7: Porovnání provizorních baterií sestavených ze 4 porovnávaných článků část 1

Typ	$M[kg]$	$V[dm^3]$	$U[V]$	$C_{MINK}[V]$	$U_{MAX}[V]$	$E_{VYB}[kWh]$	$E_B[kWh]$	$P_{MINB}[kW]$	$P_B[kW]$
Samsung INR21700-40T	**47,57**	22,69	511,2	**426,0**	**596,4**	**7,28**	10,22	63,90	76,78
	73,97	35 28	496,8	**414,0**	**579,6**	**12,32**	10,33	66,24	79,60
	98,76	47,10	482,4	**402,0**	**562,8**	**16,98**	13,80	66,33	79,60
Sony US18650VTC5A	**33,44**	15,84	511,2	**426,0**	**596,4**	**5,75**	6,65	63,90	76,68
	52,00	24,64	496,8	**427,8**	**579,6**	**9,14**	10,33	68,45	79,49
	69,43	32,89	482,4	**415,4**	**562,8**	**12,74**	13,80	68,54	79,60
Sony US18650VTC5	**31,45**	15,29	511,2	**411,8**	**596,4**	**5,93**	6,65	61,77	76,68
	47,84	23,25	486,0	**405,0**	**567,0**	**9,72**	10,11	64,80	77,76
	62,91	30,57	511,2	**426,0**	**596,4**	**13,04**	13,29	63,90	76,68
Samsung INR21700-30T	**36,50**	16,57	482,4	**402,0**	**562,8**	**5,60**	5,79	64,32	77,18
	48,35	21,95	511,2	**440,2**	**596,4**	**7,41**	7,67	66,03	76,68
	73,55	33,39	486,0	**429,3**	**567,0**	**11,47**	11,66	68,69	77,76
	96,70	43,90	511,2	**454,4**	**596,4**	**15,13**	15,34	68,16	76,68

Tab. C.8: Porovnání provizorních baterií sestavených ze 4 porovnávaných článků část 2