



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA MIKROELEKTRONIKY

**Model manažmentu nabíjecího a vybíjecího procesu
baterie pro elektromobil**

**Management Model of the Charging and Discharging
Process of a Battery for an Electric Car**

Bakalářská práce

Studijní program: Elektronika a komunikace

Vedoucí práce: Ing. Lubor Jirásek, CSc.

Kryštof Keil
Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Keil** Jméno: **Kryštof** Osobní číslo: **474240**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Model manažmentu nabíjecího a vybíjecího procesu akumulátoru pro elektromobil

Název bakalářské práce anglicky:

Management Model of the Charging and Discharging Process of a Battery for an Electric Car

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte literaturu týkající se nabíjecích a vybíjecích procesů akumulátorů používaných v elektromobilech.
2. Na základě 1. navrhnete a realizujete přípravek umožňující sledovat chování akumulátorů v nabíjecím a vybíjecím režimu zejména v různých teplotních režimech (podchlazení a přehřátí) a z toho vyplývajících změn kapacity, vnitřního odporu, případně dalších parametrů. Přípravek by měl průběžně hlásit informace o parametrech do nadřazeného řídicího centra (hlášení "dojezdových možností" v závislosti na stylu jízdy, ap.).
4. Otestujte funkčnost realizovaného přípravku, proveďte měření dosažených parametrů.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhnete případná vylepšení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Krejčířík, A.: Napájecí zdroje I. - III. Ben, Praha 1996 v pozdějších reedicích.
[2] NAVRÁTIL, Tomáš. Causa Lithium – I. DPS - elektronika od A do Z: odborný časopis pro vývoj a výrobu v oboru elektroniky. Liberec: CADware. 2018, roč. 9, č. 3 květen/červen, s. 67
ISSN 1805-5044.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Lubor Jirásek, CSc., katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **29.01.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21.05.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

Ing. Lubor Jirásek, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

Praha, 20.05.2021

Poděkování

Rád bych zde poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Luboru Jiráskovi, CSc. za odborné rady a poznatky k tématu.

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o návrhu přípravku, který je schopen monitorovat parametry akumulátoru elektromobilu během používání s důrazem na tepelné poměry během rychlého nabíjení. Nejprve jsou porovnány jednotlivé typy akumulátorů, z nichž byly vybrány ty, které dosahují nejlepších parametrů, zvláště pak největší hustoty energie, tedy Li-ion články. Poté jsou představeny možnosti aktivního řízení teploty akumulátoru a za tímto účelem vybrány Peltierovy články. Také jsou popsána zapojení elektrických obvodů, která jsou umístěna na shieldu pro použitý vývojový kit Arduino Mega, která zpřístupňují sledování stavu akumulátorů pomocí mikrokontroléru a umožňují případné chlazení nebo ohřev baterie. Poslední kapitola se věnuje testování vyrobeného modelu akumulátoru pro elektromobil.

Klíčová slova

Elektrická vozidla, lithium-iontové akumulátory, řízení teploty baterie, Peltierův článek, Arduino

Abstract

This bachelor's theses describe the design of a device that is able to monitor the parameters of an electric vehicle battery during operation with emphasis on thermal conditions during fast charging. First, the different types of batteries are compared, from which the ones with the best parameters were selected, especially with the highest energy density – Li-ion cells. Then the possibilities of active battery cooling are introduced, and Peltier elements are selected for this purpose. Also, described are electrical circuits, that are located on the shield for used development kit Arduino Mega, which provide access to monitor the state of the battery and are optionally able to cool or heat it. The last chapter is focused on testing of newly made model of battery for an electric vehicle.

Key words

Electric vehicles, lithium-ion battery, battery thermomanagement, Peltier module, Arduino

Obsah

SEZNAM ZKRATEK	9
SEZNAM VELIČIN	10
1. ÚVOD.....	11
2. TEORETICKÝ ROZBOR	12
2.1. Porovnání akumulátorových článků podle použitých chemických látek	12
2.2. Výběr konkrétního typu bateriových článků	12
2.3. Koncept přípravku jako shield pro Arduino.....	13
2.4. LCD dotykový displej.....	13
2.5. Arduino Mega	13
2.6. Možnosti chlazení baterie	14
2.6.1. Kompresor	14
2.6.2. Tepelné trubice	14
2.6.3. Peltierův článek.....	14
2.7. H-můstek	14
3. PRÁCE S LI-ION ČLÁNKY	15
3.1. Nabíjení.....	15
3.2. Vybíjení.....	15
3.3. Balancování	15
3.4. Provozní teplotní rozsahy	16
3.5. Vnitřní odpor	16
3.6. Jak odráží tyto skutečnosti systém správy baterie elektromobilu	17
4. VYBRANÉ FUNKČNÍ PRVKY ELEKTROMOBILŮ	17
4.1. Palubní nabíječka.....	17
4.1.1. Komunikace mezi wallboxem a palubní nabíječkou.....	18
4.2. Wallbox.....	19
4.3. Trakční akumulátor.....	21
4.4. Panel přístrojů	21
4.4.1. Ukazatel stavu nabití a kondice baterie	21
4.4.2. Ukazatel dojezdu	21
4.4.3. Ukazatel nejvyššího možného vybíjecího a nabíjecího výkonu.....	22
4.5. Tepelné čerpadlo	23
4.6. Nabíjení stejnosměrným proudem	23
4.6.1. CCS	23
4.6.2. CHAdeMO	23
4.6.3. GB/T.....	24
4.6.4. Tesla Supercharger	24
4.6.5. Komunikace	24
4.6.6. Použité kabely.....	24
4.6.7. Modulární koncepce výkonových modulů	24
4.6.8. Připojení nabíjecí stanice do sítě	24
4.6.9. Autorizace uživatele před nabíjením a platební metody.....	25
4.6.10. Cena	25
5. NÁVRH OBVODOVÉHO ZAPOJENÍ	25
5.1. Kreslení schématu	25
5.2. Výkonová část.....	25
5.3. Převodník proudu na napětí.....	26
5.4. Měření napětí článků v sérii mikrokontrolérem	26
5.4.1. Využití odporového děliče.....	26
5.4.2. Zapojení s diferenčními zesilovači	27
5.5. Balancovací obvody	27
5.6. H-můstek	28
5.7. Teplotní čidla	29
5.7.1. Integrovaný obvod DS18B20	29

6.	NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	30
6.1.	Výkonová část.....	30
6.1.1.	Chyba při návrhu.....	30
6.2.	Zapojení obvodů pro měření napětí mikrokontrolérem	30
6.3.	Balancovací obvody	31
6.4.	H-můstek	31
7.	FYZICKÁ KOMPLETACE MODELU	32
7.1.	Pájení	32
7.2.	Svařování	32
7.3.	Příprava teplotních čidel DS18B20	33
7.4.	Peltierovy články.....	33
7.5.	Modifikace vývojového kitu Arduino Mega	34
8.	PROGRAMOVÁNÍ.....	35
8.1.	Práce s LCDTFT displejem	35
8.2.	Řešení obnovy informací v pravidelných intervalech	35
8.3.	Sčítání miliampérhodin akumulátoru.....	36
8.4.	Práce s teplotními čidly DS18B20.....	36
8.5.	Korekce naměřených hodnot	37
8.6.	Výpočet zbývajících doby provozu do vybití akumulátoru	37
8.7.	Výpočet nabíjecího a vybíjecího proudu na základě SoC a teploty článků	38
9.	TESTOVÁNÍ.....	41
9.1.	Incident.....	41
9.2.	Testování funkce balancování	42
9.3.	Testovací scénář 1: akumulátor má na počátku teplotu 20 °C	43
9.4.	Testovací scénář 2: akumulátor je na počátku podchlazený	44
9.5.	Testovací scénář 3, akumulátor má na počátku relativně vysokou teplotu	45
10.	ZÁVĚR.....	46
11.	REFERENCE.....	47
12.	PŘÍLOHY.....	49
12.1.	Tabulka vybraných akumulátorů na trhu	49
12.2.	Schéma zapojení přípravku	50
12.3.	Hotový model	51

Seznam tabulek

TABULKA 1: ZMĚŘENÉ KAPACITY ČLÁNKŮ PO ZAKOUPENÍ.....	13
TABULKA 2: VÝKONY PALUBNÍCH NABÍJEČEK	18
TABULKA 3. NAPĚŤOVÉ STAVY NA SIGNALIZAČNÍM PINU CP (PŘELOŽENO Z [8])	19

Seznam obrázků

OBR. 1: ČASOVÉ PRŮBĚHY VELIČIN PŘI NABÍJENÍ KONSTANTNÍM PROUDEM, KONSTANTNÍM NAPĚTÍM(PŘEVZATO Z [3]).....	15
OBR. 2: BALANCOVÁNÍ ČLÁNKŮ V PROVOZU JE UŽIVATELI VYZNAČENO FIALOVÝM OBDÉLNÍKEM OKOLO BARGRAFU SOC	16
OBR. 3: SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VNITŘNÍHO ODPORU.....	16
OBR. 4: ZÁVISLOST VNITŘNÍHO ODPORU NA STAVU NABITÍ A TEPLOTĚ U 100AH AKUMULÁTORU (VYTVOŘENO PODLE DAT Z [5])	17
OBR. 5: KONEKTOR TYP 2 (PŘEVZATO Z [6]).....	18
OBR. 6: KONEKTOR TYP 1 (PŘEVZATO [7])	18
OBR. 7: OBVOD PRO SIGNALIZACI MEZI EVSE A PALUBNÍ NABÍJEČKOU (PŘEVZATO Z [10])	19
OBR. 8: ZJEDNODUŠENÉ ČASOVÉ PRŮBĚHY NAPĚTÍ NA PINU CP (PŘEVZATO Z [11]).....	19
OBR. 9: WALLBOX S PŘIPEVNĚNÝMI KABELY SE ZÁSTRČKAMI TYP 2	20
OBR. 10: NABÍJECÍ STANICE SE DVĚMA TYP 2 ZÁSUVKAMI	20
OBR. 11: SCHÉMA VÝKONOVÉ ČÁSTI	26
OBR. 12: SCHÉMA ZAPOJENÍ DIFERENČNÍCH ZESILOVAČŮ	27
OBR. 13: SCHÉMA BALANCOVACÍCH OBVODŮ	28
OBR. 14: SCHÉMA ZAPOJENÍ H-MŮSTKU.....	29
OBR. 15: ZAPOJENÍ TEPLOTNÍCH ČIDEL DS18B20	30
OBR. 16: PŘÍPRAVEK PO SPOJENÍ S ČLÁNKY BATERIE	33
OBR. 17: PELTIEROVY ČLÁNKY S NANESENOU TEPLOVODIVOU PASTOU	34
OBR. 18: ČLÁNKY BATERIE S NANESENOU TEPLOVODIVOU PASTOU	34
OBR. 19: ZMĚŘENÉ VOLTAMPÉROVÉ CHARAKTERISTIKY ČTYŘ POUŽITÝCH PELTIEROVÝCH ČLÁNKŮ.....	34
OBR. 20: NABÍJECÍ KŘIVKY VYBRANÝCH ELEKTROMOBILŮ (VYTVOŘENO PODLE DAT Z [18])	38
OBR. 21: NABÍJECÍ KŘIVKY V POMĚRU KE KAPACITĚ VYBRANÝCH ELEKTROMOBILŮ (VYTVOŘENO PODLE DAT Z [18]).....	39
OBR. 22: ZÁVISLOST NABÍJECÍHO PROUDU NA STAVU NABITÍ.....	40
OBR. 23: ZÁVISLOST VYBÍJECÍHO PROUDU NA STAVU NABITÍ	40
OBR. 24: OMEZOVÁNÍ NABÍJECÍHO VÝKONU V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ (VYTVOŘENO PODLE DAT Z [19])	41
OBR. 25: NAVRŽENÁ CHARAKTERISTIKA OMEZOVÁNÍ NABÍJECÍHO PROUDU V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ	41
OBR. 26: NAVRŽENÁ CHARAKTERISTIKA OMEZOVÁNÍ VYBÍJECÍHO PROUDU V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ.....	41
OBR. 27: PŘEPÁLENÁ CESTA NA DPS PO INCIDENTU	42
OBR. 28: MĚŘENÍ FUNKCE BALANCOVÁNÍ	43
OBR. 29: NABÍJECÍ KŘIVKA BEZ AKTIVNÍHO PELTIEROVA ČLÁNKU.....	43
OBR. 30: NABÍJECÍ KŘIVKA KDE BYL PELTIERŮV ČLÁNEK POUŽIT K OHŘEVU	44
OBR. 31: NABÍJECÍ KŘIVKA KDE BYL PELTIERŮV ČLÁNEK POUŽIT K CHLAZENÍ.....	45

Seznam zkratek

AD (převodník)	<i>Analog to Digital</i> – analogově-číslicový
PTC	<i>Positive Temperature Coefficient</i> – kladný teplotní koeficient
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i> – záporný teplotní koeficient
CC	<i>Constant Current</i> – konstantní proud
CV	<i>Constant Voltage</i> – konstantní napětí
SoC	<i>State of Charge</i> – stav nabití
PE	<i>Protected Earth</i> – ochranný vodič
N	<i>Neutral</i> – střední vodič
PP	<i>Proximity Pilot</i>
CP	<i>Control Pilot</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> – pulzně šířková modulace
DC	<i>Direct Current</i> – stejnosměrný proud
AC	<i>Alternating Current</i> – střídavý proud
EVSE	<i>Electric Vehicle Supply Equipment</i> – vybavení pro nabíjení elektrických vozidel
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i> – radiově frekvenční identifikace
RCD DD	<i>Residual Current Device Direct Detect</i> – proudový chránič detekující i stejnosměrný proud
GOM	<i>Guess-O-Meter</i>
CCS	<i>Combined Charging System</i>
V2G	<i>Vehicle to Grid</i>
PKI	<i>Public Key Infrastructure</i> – infrastruktura veřejných klíčů
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i> – polem řízený tranzistor se strukturou kov polovodič
GND	<i>Ground</i> – označení pro potenciál země
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> – deska plošných spojů (DPS)
SMD	<i>Surface Mounted Device</i>
DPS	deska plošných spojů
THT	<i>Through-Hole Technology</i>
IO	integrováný obvod
AWG	<i>American Wire Gauge</i> – standardní systém průřezu vodičů
DIP	<i>Dual In-line Package</i> – pouzdro se dvěma řadami pinů
CM	<i>Conducting Mode</i> – vodivý stav
TEC	<i>Thermo-Electric Cooler</i> – termo-elektrický chladič
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> – integrované vývojové prostředí
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i> – sběrnice k asynchronnímu sériovému přenosu dat

Seznam veličin

U_{CC}	V	napájecí napětí
R_i	Ω	vnitřní odpor
$U_{\log 1}$	V	napětí logické jedničky
U_{be}	V	napětí báze-emitor
R_b	Ω	odpor bazového rezistoru
$I_{c,max}$	A	nejvyšší proud kolektorem
U_{DC}	V	napětí akumulátoru
U_{cell}	V	napětí článku baterie
P_{CM}	W	ztrátový výkon na MOSFETu v sepnutém stavu
T_{SW}	s	doba sepnutí
R_{DSon}	Ω	odpor kanálu v sepnutém stavu
i_D	A	okamžitá hodnota proudu drainem
I_{Drms}	A	efektivní hodnota proudu drainem
U_{GS}	V	napětí gate – source
U_{DS}	V	napětí drain – source

1. Úvod

Elektromobily byly na začátku 20. století rozšířenějším typem vozidel než vozidla se spalovacím motorem, ten ale postupně elektrický pohon vytlačil. [1] V posledních deseti letech se ale elektrický pohon osobních vozidel začíná pomalu vracet. Důvodů je více, jedním z nich je snaha snížit emise, které lidstvo produkuje, a potřeba zbavit se závislosti na fosilních palivech. Tomuto vývoji napomáhá i technický pokrok v oblasti akumulátorů, jako je zvětšení hustoty energie, a tudíž dosažení většího dojezdu elektromobilu vybaveného rozměrově a hmotnostně přiměřeně velkou baterií.

Obava z krátkého dojezdu se s dnešními elektromobily již vytrácí, akční rádius 400 km zcela postačuje většině řidičů na běžné denní cesty. Co by však řidiči jistě ocenili je rychlejší nabíjení akumulátoru elektromobilu. Čas potřebný k nabití akumulátoru z 20 % na 80 % na veřejné nabíjecí stanici, která dodává stejnosměrný proud přímo do trakční baterie, udávají výrobci automobilů obvykle do 30 minut. Ale bohužel ne vždy se akumulátor může nabíjet tak rychle. Aby se tak stalo, musí být teplota baterie v relativně úzkém rozpětí hodnot. Ty se liší podle výrobce článků, ale zpravidla jde o 10 °C až 35 °C.

O udržení teploty baterie v tomto k rychlému nabíjení vhodném rozsahu teplot se stará teplotní management baterie. Výhodné z hlediska doby strávené nabíjením je, když vozidlo disponuje aktivním řízením teploty baterie, které umí podle potřeby akumulátor ochladit nebo ohřát. Bohužel ne všechny elektromobily jsou aktivním termomanagementem vybaveny a v případě přehřátí nezbývá systému kontroly baterie nic jiného než snížit maximální nabíjecí výkon například z ideálních 45 kW na pouhých 20 kW. Tomuto stavu se v elektromobilní komunitě vžilo označení *rapidgate* (odvozeno ze slova *rapidcharging*, což je u některých provozovatelů obchodní označení pro rychlé nabíjení stejnosměrným proudem). V případě pomalého nabíjení v důsledku podchlazené baterie mluvíme o *coldgate*.

V této práci jsem si dal za cíl vytvořit systém správy baterie, který pozoruje nejenom základní parametry článků jako je napětí a proud a zajišťuje ochranu proti přílišnému vybití a nabití, ale sleduje také teplotu a v případě požadavku od řidiče na rychlé nabíjení je schopen akumulátor ochladit nebo ohřát s využitím Peltierových článků.

2. Teoretický rozbor

2.1. Porovnání akumulátorových článků podle použitých chemických látek

Protože na trhu existuje větší množství různých technologií článků, vedl jsem si přehlednou tabulku (v příloze 12.1), ve které byly pro každého výrobce a kód výrobku sledovány parametry jako je nominální napětí, hmotnost, chemické složení ale také praktické vlastnosti pro použití v elektromobilu, jako je hustota energie ve vztahu k objemu a k hmotnosti, maximální a minimální teplota nabíjení a vybíjení, cena za kilowatthodinu, vnitřní odpor a maximální proud vybíjení a nabíjení ve vztahu ke kapacitě článku (v angličtině *C-rating*).

V následujícím seznamu budou jednotlivé typy akumulátorů podle použitých chemických látek představeny:

- **Olověné (Pb)** – „klasická“ často využívaná technologie akumulátorů; relativně jednoduchá na zvládnutí, bez potřeby balancování článků; relativně bezpečná (při přílišném nabití se pouze začne „vařit“ elektrolyt, tzn. voda v elektrolytu začne plynovat, rozkládat se na kyslík a vodík); nevýhodou je pouze relativně nízká hustota energie.
- **Nikl-kadmium (NiCd)** – je článek s poměrně dlouhou životností a možností rychlého nabíjení 2C; má ale relativně malou hustotu energie; nominální napětí 1,2 V.
- **Nikl-metal hybridový (NiMH)** – má stejné jmenovité napětí jako NiCd článek, avšak má přibližně třetinovou hustotu energie proti Li-ion; tento typ článku používá automobilka Toyota v některých svých hybridních vozech; na začátku milénia to byla velmi rozšířená technologie pro napájení přenosné spotřební elektroniky; nominální napětí je tedy 1,2 V.
- **Lithium-železo-fosfát (LiFePO₄)** – využití je vhodně spíše pro stacionární úložiště např. pro akumulaci energie z fotovoltaických elektráren u rodinných domů; má menší hustotu energie než Li-ion, jedná se o bezpečnou technologii, prakticky nehrozí požár; nominální napětí 3,2 V.
- **Lithium-polymer (Li-pol)** – poskytuje velmi vysoké vybíjecí proudy ve vztahu ke kapacitě (až 60C trvale, 120C ve špičkách); existuje velká variabilita prodávaných rozměrů článků; nominální napětí 3,7 V.
- **Lithium-iontový (Li-ion)** – dosahuje nejlepších hodnot hustoty energie ve vztahu k hmotnosti i objemu. Používá se v přenosné spotřební elektronice i v elektromobilech. Různé automobilky využívají různé tvarové uspořádání článků (anglicky „form factor“). Tesla využívá cylindrické články, které se označují podle rozměru například: 18650 (18 mm průměr, 65 mm délka), dále například 2170 nebo v budoucnu 4680 (u těchto větších formátů se již nula na konci neuvádí), ostatní automobilky (například koncern Volkswagen, Hyundai, Mercedes-Benz, Renault, Nissan) používají sáčkové články (z angličtiny *pouch cells*), které mají prakticky tvar kvádra a jsou dostupné ve velkém množství různých rozměrů; nominální napětí 3,7 V.

2.2. Výběr konkrétního typu bateriových článků

Po zvážení výše popsaných parametrů mi vyšla jako nejvhodnější pro model managementu vybíjecího a nabíjecího procesu akumulátoru elektromobilu v současnosti nejvíce používaná technologie Lithium-iontových článků. Poskytuje největší hustotu energie, a i když ne nejvyšší z porovnávaných, stále dostatečné vybíjecí proudy. Lithium-iontové články obecně totiž nepodporují vyšší nabíjecí proudy, ale konkrétní model, který byl vybrán, ano.

Konkrétní označení článků, které jsem zvolil je: výrobce: LG, kód výrobku: INR18650HG2. Tyto články mají vysokou kapacitu 3000 mAh (nejvyšší kapacita tohoto rozměru článků je v dnešní době 3500 mAh), rozměr 18650.

Mají také vysoký vybíjecí proud ve vztahu ke kapacitě 6,66C a velmi uspokojivý nabíjecí proud 1,33C, který je téměř nejvyšší z mnou porovnávaných Li-ion článků. Tento fakt považuji za důležitý, protože na straně výrobců i kupujících přetrvává požadavek zvýšit rychlost cestování elektromobily a zkrátit dobu nabíjení na minimum. Z toho jednoznačně plynou výzvy řešit problém se zahříváním článků během tohoto rychlého nabíjení.

Z těchto důvodů mnou navržený a vyrobený přípravek obsahuje nejenom senzor teploty, ale také aktivní chlazení a ohřívání baterie.

Hned po převzetí článků jsem s pomocí nabíječky Liitokala Lii-500 změřil (s využitím dvou různých vybíjecích proudů) jejich kapacity v mAh viz Tabulka 1.

kapacita (mAh)		číslo článku (-)			
		1	2	3	4
vybíjecí proud (mA)	500	2844	2949	2898	2959
	150	2859	2877	3030	2885

Tabulka 1: Změřené kapacity článků po zakoupení

2.3. Koncept přípravku jako shield pro Arduino

Moje návrhy počítaly s modelem řízení nabíjecího a vybíjecího procesu baterie elektromobilu jako se samostatně funkčním, dále nedělitelným celkem, který by obsahoval všechny komponenty včetně mikroprocesoru pevně umístěného na desce plošných spojů. Jako jednodušší a praktičtější se ukázal koncept, kdy na desce plošných spojů budou připevněny články baterie, další podpůrné části obvodu (např. obvod pro balancování, diferenční zesilovače atd.) a konektory budou uspořádány fyzicky stejně jako konektory vývojové desky Arduino Mega. Přípravek bude tedy v podstatě shield pro Arduino Mega. (Shield obecně znamená, že se dá přípravek jednoduše nasadit na konektory vývojového kitu a zapojit periferii bez potřeby propojovacích drátků, nepájivého pole, pájení, nebo jiné formy vodivého propojení. Když se bude s přípravkem pracovat, jednoduše se nasadí na vývojovou desku, když ne, bude mít autor Arduino Mega dostupné na jiné projekty.) Shield využívá vstupní analogové piny a výstupní digitální piny Arduino Mega.

2.4. LCD dotykový displej

Pro zobrazení stavu nabití jednotlivých článků, jejich napětí, proudu z/do akumulátoru, teplot článků, stavu ohřívání/chlazení a zbývající doby do vybití/nabití (zbývajícího „dojezdu“) byl vybrán LCD RGB displej s rozlišením 320 na 240 pixelů s možností zobrazit 16 milionů barev. Toto rozlišení poskytne dostatečný prostor na zobrazení všech důležitých informací v textové ale i grafické podobě. Právě grafická podoba měřených hodnot v podobě bargrafu je důležitá pro rychlou orientaci uživatele, kdy letným pohledem může například zjistit, že články jsou nabitě přibližně na 50 %, než aby pouze přečetl napětí v textové podobě a z něj musel usoudit, v jakém stavu články jsou. Pro případný vstup od uživatele se dá použít funkce odporového dotykového panelu s čtyřvodičovým vyhodnocením.

LCD displej, který byl použit v tomto případě, je koncipovaný jako shield pro Arduino UNO a využívá téměř všechny piny až na 4 digitální a 2 analogové piny. Takový počet zbývajících volných pinů by na obsluhu funkcí přípravku nestačil, proto musel být použit vývojový kit s větším počtem digitálních, ale hlavně analogových pinů – Arduino Mega.

2.5. Arduino Mega

Jak bylo popsáno v předchozím odstavci, jako mikrokontrolér pro řízení tohoto modelu byl použit ATmega2560 ve vývojovém kitu Arduino Mega. Jeho fyzické rozložení je stejné jako v Arduino UNO, pro které je LCD displej shield vyroben, jen s tím rozdílem, že po straně jsou přidány další konektory s více piny. Tato deska obsahuje 54 digitálních pinů a 16 analogových pinů. Z 54 digitálních pinů jich 15 podporuje PWM s frekvencí 490 Hz, případně 980 Hz.

Dále lze vyčlenit 4 páry pinů RX, TX pro sériovou komunikaci, kde komunikace může probíhat paralelně zcela nezávisle na ostatních sériových portech. Arduino Mega pracuje s napětím 5 V a na svých 15 analogových vstupech umožňuje digitalizovat signál pomocí AD převodníku s postupnou aproximací s rozlišením $n = 10$ bitů, to znamená, že rozlišení měření napětí je přibližně:

$$U_{min\ sense} = \frac{U_{cc}}{2^n} = \frac{5}{2^{10}} \cong 4,88\ mV \quad (1)$$

Mikrokontrolér je schopný vzorkovat s frekvencí 10 kHz, to znamená, že zvládne celkem 10 tisíc převodů za vteřinu na všech svých analogových vstupech. Provádět analogově-digitální převody na dvou nebo více pinech současně nelze. Vývojová deska Arduino Mega dále obsahuje převodník z USB na mikrokontrolérem použité sériové rozhraní. Převodník má označení ATmega16U2 a díky němu není problém připojit desku k počítači nebo k jiné periférii a vyměňovat data. Takt mikroprocesoru dodává krystalový oscilátor s frekvencí 16 MHz. K dispozici je 256 kB flash paměti, ze které je 8 kB využito na bootloader a pro uložení dat, které nejsou známy v době překladu programu, ale mají zůstat zachovány i po výpadku napájení, jsou vyhrazeny 4 kB EEPROM paměti.

2.6. Možnosti chlazení baterie

Jak už bylo zmíněno v úvodu, tento model managementu nabíjecího a vybíjecího procesu baterie elektromobilu si klade za cíl mimo jiné i udržovat baterii v optimální pracovní teplotě. K tomu se dá použít několik metod chlazení, každá má své výhody i nevýhody. Uvažované metody jsou popsány níže:

2.6.1. Kompresor

První lehce odvážná myšlenka byla použít ke chlazení kompresor. To by přineslo relativně vysokou účinnost chlazení, ale také mechanickou složitost výrobku, nutnost vedení různých hadiček, riziko úniku chladicí kapaliny a vyšší cenu. Na výběr je buď běžně užívaný klimakompresor ve spojení s chladicí kapalinou na bázi glykolu, která proudí hadičkami v akumulátoru v těsné blízkosti článků. V elektromobilech je to časté řešení. Někdy se používá jednodušší, ale méně účinná varianta vzduchem chlazených článků, kdy je do prostoru akumulátoru vhnán vzduch z interiéru vozu. Předpokládá se přitom, že v interiéru by během provozu měla být teplota okolo 20 °C, tedy vhodná pro fungování článků.

2.6.2. Tepelné trubice

Druhým návrhem bylo použít tepelné trubice. Při volbě správné tepelné látky, s teplotou varu okolo 40 °C by fungovalo chlazení akumulátoru spolehlivě bez potřeby externího napájení. Ale zase by byl přítomen problém s mechanickou složitostí a riziko vytečení kapaliny na články v případě poškození. Jde prakticky o pasivní chlazení, které nespotřebovává ke chlazení žádný výkon. Pasivní chlazení používají všechny dnešní elektromobily, protože jejich akumulátor je konstruován tak, že je umístěn v hliníkovém pouzdru, které zaujímá notnou plochu s okolním vzduchem.

2.6.3. Peltierův článek

Zajímavý prvek, který umí kombinovat chlazení a topení je Peltierův článek, dá se velmi jednoduše řídit elektrickým napětím a neobsahuje žádné pohyblivé součásti. Peltierův článek je složený z dvojic polovodičů typu P a N zapojených do série, uspořádaných do tvaru destičky, kde při průchodu elektrického proudu dochází na jedné ploše k odebírání tepla z okolí a na druhé k vyzařování tepla. Velkou předností je, že při změně polarity napájení dojde ke změně teplé a studené strany Peltierova článku. Při jeho použití je kritické zajistit dostatečný odvod tepla z teplé strany, jinak článek nebude fungovat správně, nejenom teplá ale i studená strana se bude zahřívat. Peltierův článek se chová jako PTC (*positive temperature coefficient*) odpor. Odpor s rostoucí teplotou také roste, takže při zahřátí jím při zachování stejného napětí protéká menší proud. Což je při napájení nejsnáze dostupným zdrojem napětí výhodné, protože v případě, že by se choval jako NTC (*negative temperature coefficient*), proud by se zvyšováním teploty rostl, tepelný výkon na součástce by rostl také a tento cyklus by se opakoval až do destrukce součástky.

2.7. H-můstek

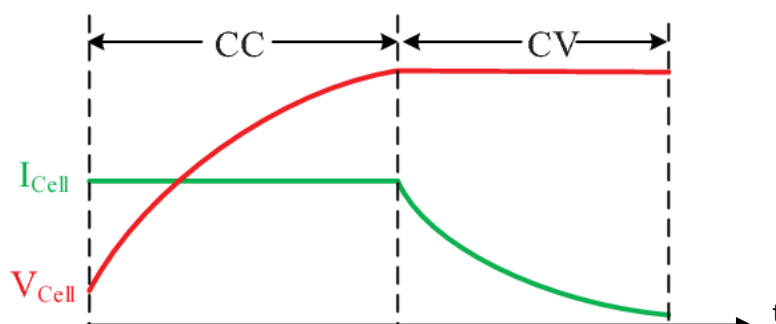
H-můstek je zapojení využívající 4 spínače ke změně polarity přivedené na vstupní svorky zátěže. Používá se u stejnosměrných motorů, kde se dá nejenom měnit směr otáčení, ale také aktivovat režim brzdy. U Peltierových článků se pomocí H-můstku dá změnit směr toku proudu, a tedy prohodit teplou a studenou stranu a změnit režim, ve kterém momentálně pracuje, z chlazení na ohřev a obráceně. H-můstek se dá zhotovit s využitím buď relé nebo tranzistorů. V případě bipolárních tranzistorů se použije většinou komplementární pár PNP a NPN, v případě unipolárních tranzistorů se použije komplementární pár s P a N kanálem.

3. Práce s Li-ion články

3.1. Nabíjení

Všechny Li-ion články mají ve svém katalogovém listu uvedenou metodu nabíjení konstantním proudem, konstantním napětím (CC-CV), jak je znázorněno na Obr. 1. To znamená, že se články mají z vybitého stavu nabíjet zdrojem proudu až do té doby, než dosáhnou maximálního povoleného napětí výrobcem, které je ve valné většině případů vyráběných typů 4,2 V (výjimku tvoří například články používané v mobilních telefonech, které jsou nabíjeny až na 4,35 V). Po dosažení nejvyššího přípustného napětí začne proud dodávaný ze zdroje do Li-ion článku postupně klesat, až dosáhne například 1/10 původního nabíjecího proudu, prohlásíme článek za nabitý [2]. Po odpojení zdroje a změření napětí na výstupních svorkách článku dostaneme hodnotu napětí zdroje sniženou o úbytek napětí na vnitřním odporu při původní hodnotě proudu před odpojením zdroje.

Přivést na terminály článku vyšší napětí, než je maximální povolené výrobcem, byt' po odpojení zdroje napětí zase klesne pod povolenou mez je nepřijatelné, protože už tehdy jsou výrazně urychleny degradační procesy v článku.



Obr. 1: Časové průběhy veličin při nabíjení konstantním proudem, konstantním napětím (převzato z [3])

3.2. Vybíjení

Vybité články lze zpravidla vyšším proudem, než je nabíjet. Je potřeba dávat pozor, aby se články nevybily pod minimální povolené napětí výrobcem, které je většinou 2,8 V, případně 2,5 V, jinak hrozí degradace. Navíc je pro nás nevýhodné, že vnitřní odpor roste s vybitím článku a prohlubuje problém s rozdílem napětí článku naprázdno a pod zátěží.

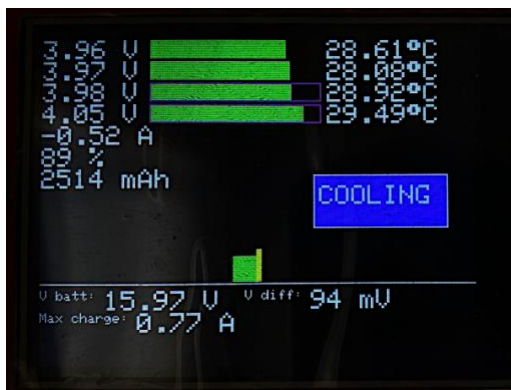
Pokud to použitá zátěž svou povahou umožňuje, je výhodné při přiblížení se vybitému stavu omezovat odebíraný proud. Když je nějaký takový systém implementován, dochází k efektivnějšímu využití energie uložené v článku. Například když dochází k odběru proudu 4 A, napětí na článku pod zátěží dosáhne 2,8 V – minimálního povoleného napětí, systém odpojí zátěž a zastaví tak vybíjení a na článku, který v ten moment už není pod zátěží, je napětí naprázdno 3,1 V (vnitřní odpor 75 m Ω). To znamená, že ještě není zcela vybitý, nějaká energie se z něj ještě dá využít. V případě, že se odebíraný proud postupně snižuje například na 2 A, poté na 1 A, dochází k využití téměř celé uložené energie.

3.3. Balancování

Na rozdíl od starších typů chemického složení, jako je olověný nebo nikel-kadmiový akumulátor, Lithium-iontový akumulátor vyžaduje provoz s technikou zvanou balancování. Balancování je proces, který udržuje napětí článků lithiových baterií v sérii v průběhu životního cyklu akumulátoru na přibližně stejné úrovni. Kdyby se tak nedělo a pouze by se sledovalo napětí každého článku v sérii, tak v případě, že kterýkoliv z článků dosáhne maximálního napětí, se nabíjení ukončí, nehledě na SoC (z angličtiny *state of charge* – stav nabití) ostatních článků. Zrovna tak, když libovolný článek dosáhne minimálního napětí povoleného výrobcem, tak se musí zase ukončit vybíjení.

V praxi by se stalo, že by se v akumulátoru během cyklování (opakování nabíjení a vybíjení akumulátoru) objevil článek, který je stále na nižším napětí než ostatní a tento článek by vždy ukončoval vybíjení. A zákonitě by se v akumulátoru vyskytl článek, který by vyčníval vyšším napětím nad ostatní a tento článek by byl ten, kvůli kterému se nabíjení vždy ukončuje. Kdyby akumulátor nebyl vybaven obvodem zajišťujícím balancování, rozdíl mezi dvěma zmíněnými články by se během používání baterie zvětšoval a využitelná energie akumulátoru by klesala. Pokud je rozdíl napětí na článku s nejmenším

a nejvyšším napětím větší než nižší desítky milivoltů, znamená to neefektivní provoz, nevyužitou kapacitu článků, a to je nežádoucí.



Obr. 2: Balancování článků v provozu je uživateli vyznačeno fialovým obdélníkem okolo bargrafu SoC

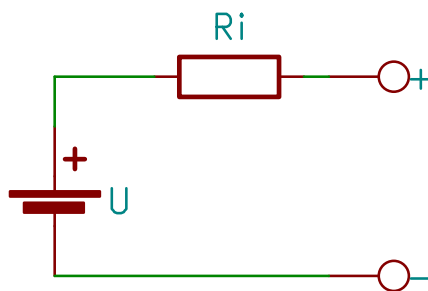
3.4. Provozní teplotní rozsahy

Při provozu lithiových akumulátorů se musí dbát na sledování teploty článků. Vybíjení je povoleno ve větším rozsahu teplot ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $60\text{ }^{\circ}\text{C}$) než nabíjení, které se smí provádět pouze v rozsahu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Li-ion články trpí při nižších teplotách tím, že se sníží iontová vodivost v elektrolytu, a tím se sníží výstupní napětí i celková dostupná energie [4]. I když údaj o minimální teplotě vybíjení článků uvedený v příložené tabulce je z datasheetu a ve skutečnosti elektromobily fungují i při nižších teplotách. Právě nemožnost nabíjení při teplotách pod nulou je limitující faktor pro používání. Například mobilní telefony se vůbec nenabíjí, když teplotní čidlo naměří teplotu telefonu pod nulou. Tady je celkem jednoduché řešení, a to zahřát telefon rukama. Ale u elektromobilu, kde baterie váží několik set kilogramů se musí použít jiná metoda. Elektromobily musí být vybaveny ohřevem baterie.

Pro nabíjení relativně vyšším proudem (větším než 2C) se někdy využívá charakteristiky vnitřního odporu článku v závislosti na teplotě takové, že při vyšších teplotách je vnitřní odpor nižší, proto je vhodné před nebo i při nabíjení zase článek externě zahřát, ale je třeba dbát na to, aby teplota nepřekročila mez přehřátí.

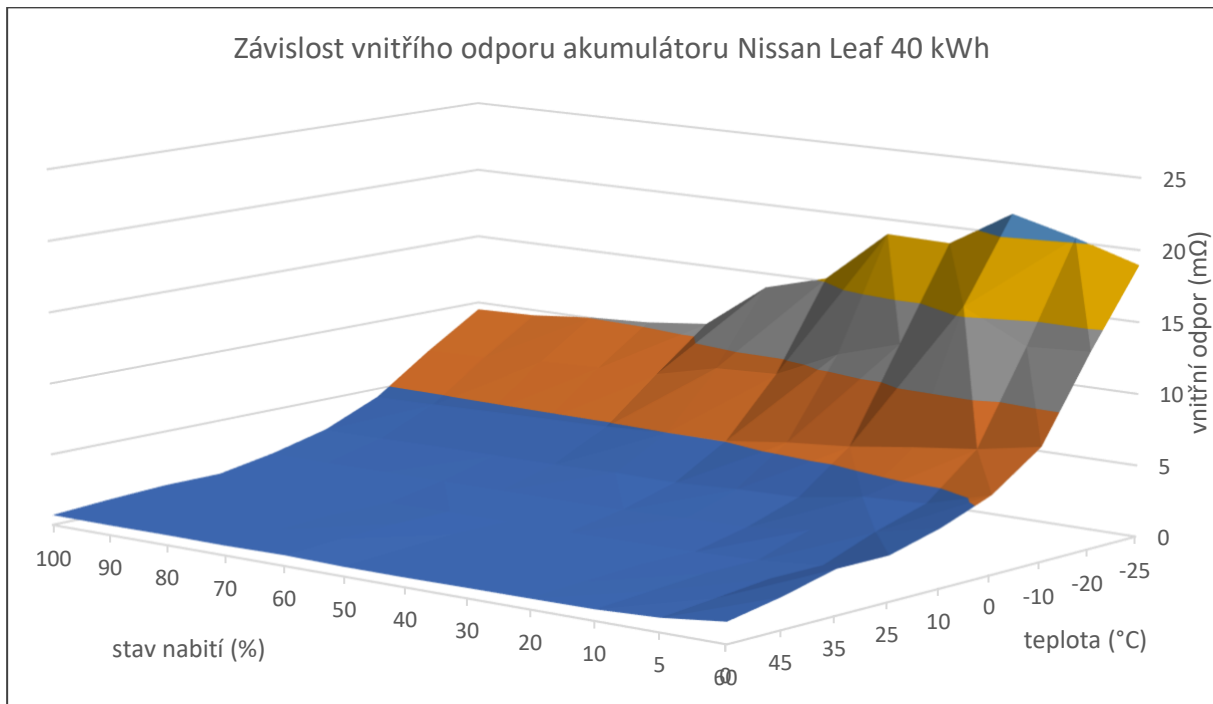
3.5. Vnitřní odpor

Často používaný termín v této práci je vnitřní odpor. Ve schématu (Obr. 3) se dá znázornit jako rezistor mezi zdrojem napětí a výstupními svorkami akumulátoru, který způsobí pokles napětí na výstupu při zatížení zdroje napětí proudem.



Obr. 3: Schématické znázornění vnitřního odporu

Vnitřní odpor je závislý jak na stavu nabití, tak na teplotě akumulátoru. Taková závislost se dá vykreslit jako 3D graf, který je zobrazen na Obr. 4.



Obr. 4: Závislost vnitřního odporu na stavu nabití a teplotě u 100Ah akumulátoru (vytvořeno podle dat z [5])

Vnitřní odpor u tohoto 100Ah akumulátoru z grafu dosahuje hodnot 0,7 mΩ až 19 mΩ. Největší je v oblasti s nízkou teplotou a nízkým stavem nabití. Naopak nejnižší vnitřní odpor je při vysokém stavu nabití a vyšší teplotě.

3.6. Jak odráží tyto skutečnosti systém správy baterie elektromobilu

Systém správy baterie obsahuje voltmetry k měření napětí každého článku v baterii. Dále zahrnuje čidla teploty, které monitorují teplotu uvnitř akumulátoru. S pomocí dat z ampérmetru se dá určit zbývající kapacita v Ah nebo i přímo v praktičtější jednotce energie – v kWh. Systém je propojen sběrníci a komunikuje s palubní nabíječkou, regulátorem elektromotoru anebo s vnější nabíjecí stanicí dodávající stejnosměrný proud. Regulátoru elektromotoru předává informaci o maximálním možném vybíjecím proudu. A palubní nabíječka, vnější nabíjecí stanici dodávající stejnosměrný proud a regulátoru elektromotoru, který také někdy dodává rekuperací proud do baterie, předává systém správy baterie informaci o momentálním maximálním možném nabíjecím proudu. Obě hodnoty (maximální možný vybíjecí a nabíjecí proud) jsou vypočteny na základě teploty a stavu nabití baterie. Systém správy baterie se dále stará o balancování článků, které se děje, když se baterie nabíjí a stav nabití se blíží 100 %.

Jak bylo řečeno v úvodu, některé elektromobily také disponují možností ohřívat a chladit baterii. Ohřívat baterii je téměř nutné, když má teplotu pod 0 °C a má docházet k jejímu nabíjení. Někdy je také baterie ohřívána na teplotu kolem 50 °C k dosažení nižšího vnitřního odporu, a tudíž větších výkonů, které se dodají do elektromotoru (sportovní režimy). O spuštění chlazení rozhodne systém na základě toho, že naměřená teplota přesahuje určitou mez. V případě článků, které jsou pro lepší výkon vyhřívány na 50 °C, je tato mez například 55 °C, z čehož plyne, že je relativně úzké rozmezí ideální teploty. Pro ostatní typy článků, které na rozdíl od předchozích zmíněných neobsahují speciální aditiva v elektrolytu (více v odstavci 4.4.3), je mez přehřátí nižší, například 40 °C.

4. Vybrané funkční prvky elektromobilů

V této kapitole budou popsány některé komponenty elektromobilů a vysvětlena jejich úloha.

4.1. Palubní nabíječka

Pro nabíjení elektromobilu přímo ze střídavé elektrorozvodné sítě se využije palubní nabíječka, ta konvertuje střídavé napětí ze sítě na stejnosměrné napětí pro baterii. Palubní nabíječka je v podstatě spínaný zdroj, pro výrobce je důležité dbát na to, aby byl odebíraný proud přibližně sinusový bez vyšších harmonických složek, a tudíž aby se účinek co nejvíce blížil jedné. Zatím tu bylo popisováno nabíjení baterie konstantním proudem, ale palubní nabíječka je založena na jiném principu, a to takovém, že

musí odebírat ze střídavé sítě konstantní proud podle dostupného jističe (dostupného proudu) na dané lokalitě.

Nabíjení vozidel střídavým napětím upravuje v Severní Americe standard SAE J1772 a v Evropě norma EN 62196. Ty specifikují fyzické uspořádání konektoru v Severní Americe označovaného jako Typ 1 a v Evropě označovaného jako Typ 2. Zásuvka Typ 1 podporuje pouze jednu fázi (v Severní Americe nejsou 3 fáze v domácnostech běžné) a zásuvka Typ 2 podporuje až 3 fáze (v Evropě velmi rozšířené i v domácnostech).



Obr. 5: Konektor Typ 2 (převzato z [6])



Obr. 6: Konektor Typ 1 (převzato [7])

Konektor Typ 2 obsahuje tři fázové piny, PE, N a k tomu na komunikaci 2 další piny – *proximity pilot* (PP) a *control pilot* (CP). V příložené tabulce jsou uvedeny výkony běžných palubních nabíječek v Evropě prodávaných modelů elektromobilů a s jakým proudem a počtem fází pracují. Zajímavý je přístup koncernu Volkswagen, který své vozy vybavil palubními nabíječkami, které ve výchozím stavu odebírají proud 16 A ze dvou fází. Pokud je k dispozici jen jedna fáze, umí palubní nabíječka odebírat proud 32 A z jedné fáze a nabíjet tedy stejným výkonem, s tou nevýhodou, že dochází k méně rovnoměrnému zatěžování sítě než při odběru proudu ze dvou fází. Optimální je samozřejmě mít palubní nabíječku, která odebírá stejný proud ze všech tří fází.

efektivní hodnota napětí [V]	počet fází [-]	proud [A]	výkon [kW]	používá např.
230	1	16	3,7	VW e-Up 2013-2019
230	2	16	7,4	VW e-Golf Škoda Citigo ^e iV
230	3	16	11	Tesla Model 3 (EU) Škoda Enyaq iV
230	1	32	7,4	Jaguar i-Pace před 2020
240	1	28	6,6	Fiat 500e před 2020
230	3	25	17	Tesla Model S po 2017
230	3	32	22	Tesla Model S před 2017 (za příplatek) Audi e-tron (za příplatek)

Tabulka 2: Výkony palubních nabíječek

4.1.1. Komunikace mezi wallboxem a palubní nabíječkou

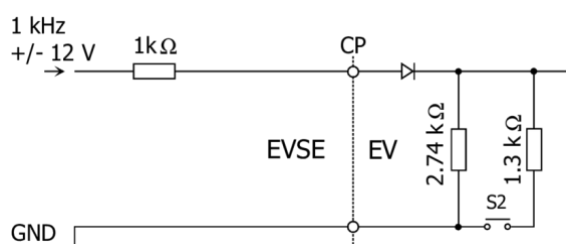
Pin **Proximity pilot** má tu funkci, že podle hodnoty odporu rezistoru umístěného uvnitř konektoru kabelu v dedikovaném místě mezi piny PP a PE určí palubní nabíječka z převodní tabulky z normy maximální možný proud, který může protékat použitým kabelem. Mimochodem se dá, jak z anglického názvu *proximity* – blízkost plyne, podle odporu rozpoznat, že je zapojený kabel. Když kabel zapojený není, je rozpojený obvod tzn. je nekonečný odpor.

Funkce pinu **Control pilot** [8] je o něco komplikovanější, ve výchozím stavu (kabel není zapojen do vozidla, jen do wallboxu) je na pinu CP přítomný stejnosměrný signál o hodnotě 12 V vůči vodiči PE. Jakmile je kabel zapojen do vozidla, je tato skutečnost wallboxu (wallbox vozidlu zprostředkovává

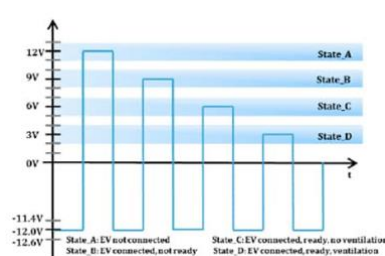
střídavé napětí z elektrorozvodné sítě, bude podrobněji vysvětlen v následující kapitole 4.2) signalizována tak, že se vlivem odporového děliče tvořeného odporem o hodnotě 882Ω (při praktické realizaci často bývá použit $1 \text{ k}\Omega$) ve wallboxu za zdrojem tohoto signálního napětí a odporu v palubní nabíječce automobilu o hodnotě 2740Ω sníží hodnota napětí na pinu CP na 9 V vůči vodiči PE. V tuto chvíli začne wallbox vysílat PWM signál o frekvenci 1 kHz , kde střída nese informaci o maximálním možném odebíraném proudu. Tento signál z wallboxu vysílá obvod pro komunikaci, který je mimo jiné tvořen zdrojem $\pm 12 \text{ V}$, protože tato PWM je nestandardní v tom, že obsahuje i záporné napětí. V palubní nabíječce je signální obvod složen z diody (proto je princip odporového děliče uplatněn jen na kladnou periodu signálu PWM, záporná zůstává nezměněna) a přepínatelné matice odporů. V případě, že je vozidlo připraveno nabíjet, přepne v palubní nabíječce na přepínatelné matici rezistorů odpor tak, že mezi CP a PE bude 882Ω a kladná část periody napětí na tomto odporovém děliči bude teď 6 V . To je signál pro wallbox, že nyní lze sepnout relé a přivést na fázové piny napětí. Tato vlastnost přidává na bezpečnosti, protože na kabelu zapojeném do wallboxu, ale ne do vozidla není přítomné napětí (pouze tedy DC 12 V na CP, ale ne AC $230 \text{ V}/400 \text{ V}$). To ale také neplatí vždy, pokud je maximální vybavovací proud jističe 16 A , norma připouští, že napětí může být na konektoru přítomné po celou dobu. Dále je definována úroveň 3 V pro signalizaci, že vozidlo potřebuje ventilaci. Poslední dva definované stavy jsou pro signalizaci chyby, napětí mezi CP a PE je 0 V , nebo stejnosměrných -12 V . Převodní vztah (2) a (3) hodnoty střídy signálu PWM na maximální hodnotu odebíraného proudu palubní nabíječkou je součástí normy. Maximální možný proud protékající přes konektor Typ 1 je 80 A (240 V , až $19,2 \text{ kW}$), přes konektor Typ 2 je 64 A (230 V , 3 fáze, až 43 kW).

stav	CP napětí kladná perioda	CP napětí záporná perioda	frekvence	odpor CP-PE	popis
Stav A	12 V	není	DC	rozpojený obvod	není připojeno
Stav B	9 V	-12 V	1 kHz	$2,74 \text{ k}\Omega$	připraveno k nabíjení
Stav C	6 V	-12 V	1 kHz	882Ω	nabíjení
Stav D	3 V	-12 V	1 kHz	246Ω	nabíjení s ventilací
Stav E	0 V	0 V	není	—	chyba
Stav F	není	-12 V	DC	—	neznámá chyba

Tabulka 3. Napěťové stavy na signalizačním pinu CP (přeloženo z [9])



Obr. 7: Obvod pro signalizaci mezi EVSE a palubní nabíječkou (převzato z [10])



Obr. 8: Zjednodušené časové průběhy napětí na pinu CP (převzato z [11])

4.2. Wallbox

Wallbox sice není součástí elektromobilu, ale zprostředkovává palubní nabíječce střídavé napětí z elektrické rozvodné sítě. Obecnější ale méně zvučný název pro toto zařízení je EVSE (z angličtiny *electric vehicle supply equipment*). Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, poskytuje palubní nabíječce vozu PWM signál s informací o maximálním dostupném proudu. Wallbox také musí obsahovat relé, které sepne a přivede na fázové piny napětí, když wallbox obdrží signál k započatí nabíjení od palubní nabíječky.

Wallboxy se vyrábí v provedení buď se zásuvkou Typ 2 nebo s kabelem napevno a zástrčkou na konci (Typ 1 nebo Typ 2). V Evropské Unii byla jako norma přijata Typ 2. Zásuvka má tu výhodu, že do ní uživatel připojí kabel z Typ 2 (wallboxy se zásuvkou Typ 1 se nevyrábí) na libovolný konektor, co používá jeho vozidlo. Kabel napevno připevněný k wallboxu může být komfortnější pro ty uživatele, kteří mají odpovídající konektor na straně vozidla (nemusí vyndávat z kufru svůj), ale komplikace pro ty, kteří odpovídající konektor na straně vozidla nemají. Tito uživatelé musí využít různých redukcí, například majitelé vozidel dovezených ze Severní Ameriky musí použít redukci z Typ 2 na Typ 1.

Některé wallboxy jsou vybaveny aktuátorem k uzamčení kabelu v zásuvce, aby nikdo neoprávněný během nabíjení nemohl kabel vytáhnout. Tento zámek je zamknut současně se sepnutím relé, když je napětí mezi CP a PE 6 V (signalizace nabíjení), a zase odemknut, když se nabíjení ukončí, když je napětí mezi CP a PE 9 V (signalizace připraveno k nabíjení).

Pro proudy větší jak 32 A (230 V, 3 fáze – výkon 22 kW) musí mít wallbox svůj vlastní kabel napevno. V případě, kdy poskytuje konektor Typ 2 všechny 3 fáze, palubní nabíječka automobilu odebírá ze všech tří fází stejný proud, komunikace neumožňuje sdílet maximální proud pro každou fázi zvlášť ani palubní nabíječky neumí odebírat z každé fáze jinou hodnotu proudu. Pevný wallbox je skříňka připevněná na zdi, nebo sloupek umístěný u parkovacích míst.



Obr. 9: Wallbox s připevněnými kabely se zástrčkami Typ 2



Obr. 10: Nabíjecí stanice se dvěma Typ 2 zásuvkami

Existuje i přenosný wallbox, který si uživatel vozí s sebou a umožňuje nabíjet vozidlo například z průmyslové zásuvky 3 fáze 400 V, takzvaného „červeného pětikolíku“. Přenosný wallbox se označuje zařízení, které obsahuje zástrčku do 3fázové zásuvky 400 V a Typ 2 zásuvku. Pokud toto zařízení obsahuje zástrčku do 3fázové zásuvky 400 V a kabel s Typ 1 nebo Typ 2 zástrčkou, mluví se o něm spíše jako o nabíjecím kabelu i když funkce a elektronika uvnitř je stejná.

Přenosný wallbox/nabíjecí kabel musí disponovat funkcí **vstup** (například tlačítko, rotační enkodér, potenciometr) a **výstup** (indikační LED u popisku hodnoty proudu ze škály nebo displej), kde může uživatel zadat maximální proud, ten by měl uživatel znát, měl by vědět jaký jistič je před danou zásuvkou. Pokud bude vozidlo nabíjet větším proudem, než je maximální proud jističem, jistič se vypne.

Funguje-li wallbox v režimu placeného nabíjení, je vybaven čtečkou RFID karet, kde se uživatel autorizuje a následně je mu fakturována spotřeba. Dále takový wallbox disponuje komunikací s internetem, případně displejem k zobrazení například spotřebovaných kWh, nebo jiných informací.

Nově prodávaná EVSE musí obsahovat proudový chránič, který umí detekovat nejenom střídavý ale i stejnosměrný unikající a poruchový proud (RCD DD – *residual current device direct detect*), tedy RCD typu B. Použitý proudový chránič se musí vypnout, pokud detekuje reziduální proud o střídavé složce v blízkosti frekvence 50 Hz větší než 30 mA, nebo stejnosměrný proud větší než 6 mA.

Pokročilejší funkcí wallboxů je řízení výkonu v závislosti na aktuálním odběru například všech wallboxů v garáži nebo celé budovy. Představme si třeba, že když je rezervovaný příkon pro 5 zásuvek Type 2 v garáži 50 kW a jsou využívány jen 2 zásuvky, pak může každé vozidlo odebírat plných 22 kW, pokud se ale připojí 5 vozidel, je pro každé dostupný výkon jen 10 kW. Další příklad z rodinného domu: pokud má budova hlavní jistič 25 A, spotřebiče v domácnosti zrovna odebírají z jedné fáze 10 A, z ostatních fází méně, vyhodnotí propojený ampérmetr a wallbox, že pro nabíjení zbývá 15 A.

Wallbox také může fungovat ve spojení s fotovoltaickou elektrárnou a podle aktuálního výkonu výroby FVE upravovat nabíjecí výkon elektromobilu. Norma definuje čas, za jaký musí palubní nabíječka

zareagovat na změnu střídy na pinu CP, a tedy případně změnit odebíraný proud jako maximálně 5 sekund, ale většina palubních nabíječek zareaguje podstatně rychleji.

Vzorec pro výpočet střídy (v procentech) z proudu je:

Pro proud mezi 6 A až 51 A:

$$\text{střída} = \frac{I_{max}}{0,6} (\%) \quad (2)$$

Pro proud mezi 51 A až 80 A se vzorec změní na:

$$\text{střída} = \frac{I_{max}}{2,5} + 64 (\%) \quad (3)$$

4.3. Trakční akumulátor

Jak z názvu plyne, trakční akumulátor je určen k uložení energie pro pohon elektromobilu. V současné době se u nově vyráběných vozidel rozlišuje 400V a 800V architektura. Každá má své výhody a nevýhody. 400V architektura je složena z přibližně 100 Li-ion článků v sérii, rozsah napětí je od 250 V do 450 V. 800V systém přináší některé výhody, jako například, že pro stejný výkon je v porovnání s 400V architekturou potřeba poloviční proud, a jsou tudíž jen 1/4 tepelné ztráty ve vodičích. Mezi nevýhody patří potřeba většího počtu monitorovacích a balancovacích obvodů a fakt, že většina nabíjecích stanic dodávajících stejnosměrný proud je konstruována na napětí do 500 V, takže pro nabíjení na nich musí mít vozidlo svůj vlastní palubní zvyšující měnič napětí pro výkony okolo 50 kW – 150 kW.

Trakční akumulátory jsou rozděleny do modulů po 6 až 20 článků v sérii, které mohou být nedestruktivní cestou vyměněny jednotlivě. Každý modul je spojen se zbytkem akumulátoru elektrickým konektorem pro velké výkony, konektorem pro komunikaci a v případě, že je uzpůsoben pro průtok chladicí kapaliny, je také vybaven hadicovými spojkami. Trakční akumulátory jsou obvykle umístěné v hliníkovém pouzdru na spodku vozidla pod podlahou. Kvůli této poloze existuje riziko proražení krytu, proto je pouzdro z exponované strany vyztuženo, u některých modelů i s využitím titanu. Kromě trakčního obsahují elektromobily ještě relativně malý 12V akumulátor k napájení palubních systémů, světel atd. 12V akumulátor je nabíjen z trakčního přes snižující měnič napětí. Uložená energie v trakčních akumulátorech dnes prodáváných elektromobilů se pohybuje mezi 17,6 kWh (Smart EQ forfour) až 317 kWh (nákladní vůz Volvo FL Electric). Pro představu, spotřeba elektrické energie se pohybuje od 12 kWh/100 km u malých aut, přes 22 kWh/100 km u SUV, až po 100 kWh/100 km u nákladních automobilů a autobusů.

4.4. Panel přístrojů

Elektromobily se od vozidel s konvenčním pohonem liší i v několika detailech na panelu přístrojů.

4.4.1. Ukazatel stavu nabití a kondice baterie

První pochopitelnou změnou je změna z ukazatele stavu paliva v nádrži na ukazatel stavu nabití baterie, ten může být buď v provedení analogovém s ručičkou a servomotorem nebo na displeji s ikonou baterie se zeleně nebo modře vybarvenou oblastí, která postupně ubývá a textovou informací o stavu nabití baterie v procentech.

Ne příliš obvyklá funkce je zobrazení kondice baterie přímo v panelu přístrojů. Například Nissan Leaf 24 kWh ji ale zobrazuje. Vyjadřuje, jak se zmenšila maximální využitelná kapacita vzhledem k původnímu stavu, když byl akumulátor nový.

4.4.2. Ukazatel dojezdu

K ukazateli dojezdu zaujímají výrobci automobilů tři různé přístupy.

První je **dynamicky proměnný odhad**, v angličtině *Guess-o-meter*, zkratka GOM. GOM vypočítává dojezd na základě spotřeby energie za posledních několik ujetých kilometrů. Takže například na konci táhlého kopce zobrazuje velmi krátký dojezd, který předpokládá situaci, že takové stoupání a tomu odpovídající spotřeba budou po celou zbývající trasu a takový údaj dojezdu zobrazí. Naopak při jízdě z kopce, kde se navíc využívá rekuperace a spotřeba elektrické energie na jednotku vzdálenosti může dosáhnout záporných hodnot, může GOM ukázat nadměrně optimistický odhad

dojezdu. GOM také ovlivňují spuštěné spotřebiče, jako je vytápění nebo klimatizace, hned od momentu, kdy se zapnou, tzn. dojezd se přepočítá, jako by měla být klimatizace nebo vytápění zapnuté po celou dobu jízdy. Právě tato dynamická charakteristika některé uživatele elektromobilů děsí, když mylně interpretují dramatický úbytek zobrazovaného dojezdu za krátkou dobu jako fakt, že přišli o velké množství energie za krátký čas. Přitom jediné, co se změnilo je spotřeba elektrické energie na vzdálenost. GOM využívají například Nissan, Citroën, Peugeot, koncern Volkswagen a BMW.

Druhý přístup spočívá ve vypočítání zobrazovaného dojezdu na základě **pevné konstanty spotřeby** a zbývající energie v akumulátoru. Obvykle se rozlišuje mezi dvěma konstantami, *rated* – spotřeby, které se dosahovalo během schvalovacího procesu vozidla a *typical* – spotřeby která více reflektuje provoz v reálném světě. Hodnota dojezdu zobrazeného při 100 % stavu nabití baterie je také způsob jak si rychle a jednoduše zjistit degradaci baterie přímo z informačního systému vozidla, pokud známe dojezd zobrazovaný, když byl akumulátor nový. Zastáncem zobrazování dojezdu podle pevné konstanty je automobilka Tesla.

Poslední přístup pro výpočet dojezdu, nebo přesněji zbývajícího stavu baterie v cíli cesty, je využití **navigace**. Je nutné poznamenat, že vždy jde jen o doplněk k jedné ze dvou předešlých variant. Pokud se do navigace zadá cíl cesty, je systém schopen velmi přesně odhadnout SoC v cíli. Navigace do výpočtu zahrnují výškový profil trasy, maximální rychlosti na daných úsecích silnic, a pokud jsou připojené k internetu, což dnes už často jsou, zahrnou i aktuální počasí na trase získané z on-line služeb předpovědi počasí. Například při nižších teplotách roste spotřeba elektromobilu, důvodem je potřeba vytápět interiér ale i hustší vzduch, a tedy i větší aerodynamický odpor. Mokrá silnice, nebo silnice pokrytá sněhem zase zvyšují valivý odpor kol, a tedy i spotřebu. Obvyklá funkce takovýchto navigací je i nalezení nabíječek na trase a zobrazení dostupných konektorů. Jako doplněk k navigaci na nabíječku umí někteří výrobci i optimálně předehtřívát baterii během cesty k nabíjecí stanici tak, aby se hned po zapojení dosahovalo co nejvyšších nabíjecích výkonů. Jako zajímavost lze uvést, že pokud nějaký vůz takovou navigaci nemá, dá se využít například stránka www.abetterrouteplanner.com, která obsahuje stejné funkce a v základní verzi je zdarma.

4.4.3. Ukazatel nejvyššího možného vybíjecího a nabíjecího výkonu

Aby řidič věděl, jaký výkon může od elektromobilu očekávat, je mu indikován maximální vybíjecí výkon. Jak bylo popsáno v kapitole 3.4, maximální vybíjecí výkon z akumulátoru sice neomezí chladné teploty, ale může jej omezit přehřátí baterie nebo pohonné jednotky (elektromotoru nebo regulátoru elektromotoru). Další faktor, který může omezit maximální výkon je vybitý akumulátor a implementace systému omezujícího vybíjecí proud popsaného v kapitole 3.2. Omezení výkonu je indikováno buď dedikovanou ručičkou nebo grafikou na displeji. Když je omezení už opravdu znatelné, má vozidlo pomalejší akceleraci, případně není schopné vyvinout dostatečnou rychlost do kopce. Při nejvyšším stupni omezení výkonu se navíc u některých modelů automobilů rozsvítí na panelu přístrojů ikona želvičky.

K omezování výkonu nabíjení dochází buď kvůli nízké teplotě baterie, vysokému stavu nabití baterie, nebo kvůli přehřáté baterii. Jelikož se na okamžitý výkon získaný rekuperací pohlíží stejně jako na jakékoliv jiné nabíjení akumulátoru, je i výkon rekuperace závislý na stavu baterie. Pokud má akumulátor pod 0 °C, rekuperace nefunguje žádná, nebo jen velmi malým výkonem, když má akumulátor mezi 0 °C až 10 °C, možný nabíjecí výkon, a tedy i brzdny účinek rekuperace se zvyšuje. Naopak když se začne teplota baterie u některých modelů blížit 40 °C, nabíjecí výkon, a tedy i vliv rekuperace na brždění se začne snižovat. Hranice 40 °C stupňů přibližně platí pro většinu modelů elektromobilů, ale ne pro ty, které pro lepší výkon (menší vnitřní odpor) akumulátor vyhřívají na teplotu okolo 50 °C, toto praktikuje například Tesla, která používá speciální aditiva do elektrolytu, díky kterým baterie při teplotách okolo 50 °C nedegraduje. Pro zajímavost lze uvést způsob, který většina uživatelů nepoužije, ale v případě, když je potřeba rychle nabíjet akumulátor elektromobilu, který je například ráno v zimě promrzlý, dá se relativně rychle ohřát. A to tím, že se nějakým způsobem začne z baterie záměrně odebírat relativně větší proud, například při akceleraci se dodává velký výkon do elektromotoru, a tudíž kvůli tomu, že účinnost celého systému není 100 %, se nějaká část energie ztratí ve formě tepla, které ohřeje baterii. Po pár minutách takové jízdy se dá ohřát akumulátor vozidla i o desítky stupňů Celsia a tento způsob je tedy rychlejší než dedikovaný ohříváč baterie, který má výkon nižší jednotky kilowattů, pokud tedy je vůbec k dispozici.

Poslední důvod, který omezuje účinek rekuperace je stav nabití akumulátoru blízky 100 procentům, získanou energii tehdy už jednoduše není kam ukládat. Je tedy vhodné s tím při nabíjení počítat. V případě, že několik prvních kilometrů je z kopce, nenabíjet do 100 %, ale jen do 90 % – 95 %. Jinak se veškerá potenciální energie ztratí na teplo v třecích brzdách a brzdy se zbytečně opotřebí. Elektromobilů, které mají indikaci dostupné rekuperace, je spíše menšina, ale jde o užitečnou funkci. Pokud je řidič zvyklý, že pustí pedál akceleračního a auto hned začne rekuperací brzdit a najedou se tak z nějakého důvodu neděje, je to spíše nepříjemné překvapení.

4.5. Tepelné čerpadlo

Prvek, který zvyšuje efektivitu elektromobilu, je tepelné čerpadlo. Tepelné čerpadlo v elektromobilu odebírá teplo z jednoho bodu a soustředí ho do jiného bodu. Tepelné čerpadlo využívá odpadní teplo vzniklé provozem komponent elektromobilu, jako jsou elektromotor, regulátor elektromotoru nebo akumulátor k vytápění interiéru a zvyšuje tak efektivitu provozu elektromobilu a snižuje spotřebu. Například, když je akumulátor během rychlonabíjení zahříván na 50 °C, dochází po skončení nabíjení k odebírání tepla z akumulátoru a toto teplo je během prvních několika desítek minut jízdy využito na vytápění interiéru. Proti tepelnému čerpadlu je méně efektivní způsob vyhřívání kabiny prostým odporovým topením, obvykle PTC, protože mají ze své charakteristiky odporu zvyšujícího se s teplotou samoregulační funkci.

4.6. Nabíjení stejnosměrným proudem

Na nabíjení elektromobilů stejnosměrným proudem se často referuje jako na rychlé nabíjení, i když výkony některých prodávajících veřejných nabíječek dodávajících stejnosměrný proud se pohybují od pouhých 24 kW, což se blíží rychlosti některých palubních nabíječek. Ale to je jen výjimka potvrzující pravidlo.

Obecně platí, že nabíjení stejnosměrným proudem je nejrychlejší možnost nabíjení elektromobilů a už v současné době existuje síť nabíjecích stanic, která umožňuje nabíjet výkonem až 350 kW. DC nabíječka funguje tak, že se při nabíjení úplně vynechá z řetězce palubní nabíječka a konverze ze střídavého napětí na stejnosměrné napětí probíhá mimo vozidlo. Na alespoň desítkách lokalitách po celém světě jsou v současné době rozšířené čtyři druhy konektorů, které budou dále podrobněji popsány. Kromě nich existují i další méně rozšířené konektory.

4.6.1. CCS

Nejrozšířenějším je CCS, zkratka pocházející z anglického *Combined charging system*, tento konektor kombinuje na straně vozidla piny pro nabíjení střídavým proudem, komunikaci a piny pro stejnosměrný proud. Existuje verze pro Severní Ameriku a Evropu, kde konektor pro střídavý proud je buď Typ 1 nebo Typ 2, obě varianty ale mají ještě pod ním umístěné dva velké piny (+ a –) pro stejnosměrné nabíjení. Toto provedení zahrnující všechno v jednom konektoru je výhodné, a navíc je v provedení s Typ 2 zavedeno jako evropský standard. Proto se v Evropě prodává nejvíce vozidel právě s CCS konektorem. Maximální přenášený výkon je 350 kW. Komunikace automobilu a nabíjecí stanice probíhá přes protokol PLC (*power line communication*). Pro komunikaci se využívá stejně jako u Typ 2 hlavně pin CP, s tím, že počáteční pobídka pro vozidlo k započítí digitální komunikace s nabíjecí stanicí je střída 5 % [12].

4.6.2. CHAdeMO

Další konektor je CHAdeMO, vyvinutý v Japonsku. Název konektoru je poeticky odvozen ze sousloví v japonštině „nedáte si šálek čaje?“ což nastiňuje, jak se dá využít čas během nabíjení. Maximální nabíjecí výkon přes konektor CHAdeMO verze 2 je až 400 kW (1000 V, 400 A). Až do roku 2015 šlo o nejrozšířenější typ konektoru u elektromobilů, poté začal být vytlačován CCS. Nové nabíjecí stanice s konektorem CHAdeMO se však stále budují, a i dotační tituly z Evropské Unie ho vyžadují pro uznání dotace na nabíjecí stanici. Automobily s CHAdeMO vyrábí už 10 let Nissan, ale už i ten od CHAdeMa upouští a nový model Ariya bude mít kromě kusů prodávajících v Japonsku konektor CCS. Pro komunikaci se používá protokol CAN. CHAdeMO umí zajímavou funkci označovanou jako V2G, *vehicle-to-grid*. Možnost vybit akumulátor vozidla a přes *grid-tie* invertor dodávat energii buď do svého domu nebo do veřejné rozvodné sítě a profitovat z rozdílu cen na trhu s elektrickou energií. Vozidla s CHAdeMO musí mít pro nabíjení střídavým proudem oddělenou zásuvku buď Typ 1 nebo Typ 2.

4.6.3.GB/T

V Číně se používá konektor GB/T. Maximální výkon je 188 kW (750 V, 250 A). Pro komunikaci se používá protokol CAN. Stejně jako u předchozího konektoru, GB/T nepodporuje nabíjení střídavým proudem a musí být doplněn zásuvkou Typ 1 nebo Typ 2.

4.6.4.Tesla Supercharger

Poslední celosvětově rozšířený typ DC rychlonabíjecí stanice je Tesla Supercharger. V současné době jde o síť přístupnou pouze pro vozy značky Tesla. Ale v budoucnu se může otevřít i pro automobily jiných výrobců. V Severní Americe využívá proprietární Tesla konektor, v Evropě se mezi lety 2012 až 2019 používal pouze modifikovaný konektor Typ 2, který umí přenášet i stejnosměrný proud. Ale na začátku roku 2019 s příchodem prodejů nového Modelu 3 v Evropě, vybaveného standardním konektorem CCS se začaly stanice vybavovat konektorem CCS. V Číně se využívá GB/T. Právě použití standardizovaných konektorů umožňuje v budoucnu mimo Severní Ameriku relativně snadno otevřít síť i pro vozy jiných značek. Maximální výkon je pro Supercharger verze 2 s vzduchem chlazenými kabely 150 kW, pro verzi 3 s kapalinou chlazenými kabely 250 kW.

4.6.5.Komunikace

Komunikace mezi nabíjecí stanicí a vozidlem probíhá přes zmíněné protokoly PLC a CAN. Při zahájení nabíjení vozidlo stanicí sdělí maximální možné napětí, na které až je možné nabíjet a maximální možný nabíjecí proud pro zahájení nabíjení. Poté stanice provede kontrolu izolace, a když je vše v pořádku může začít nabíjení. Vozidlo sepne výkonové relé a na kontakty nabíjecího konektoru přivede napětí z trakční baterie. Poté začne stanice dodávat proud do akumulátoru. Této úvodní komunikaci se říká *handshake*. V průběhu nabíjení vozidlo průběžně mění požadovanou hodnotu proudu, například přes CHAdeMO posílá vozidlo aktualizaci každých 100 ms. Vozidlo kontroluje dodávaný proud svým ampérmetrem, a pokud naměřený proud překračuje požadovanou hodnotu, může vozidlo z důvodu ochrany akumulátoru nabíjení ukončit.

4.6.6.Použité kabely

Pro nabíjení stejnosměrným proudem do 200 A se používají pasivně chlazené kabely, pro proudy nad 200 A se musí už využít kapalinou chlazené kabely. Bylo by možné používat i pasivně chlazené kabely, ale buď by vodiče musely mít velký průřez, což by zvýšilo cenu a špatně by se s nimi manipulovalo, nebo by v nich byly velké tepelné ztráty a teplotní čidla společně s ovládací logikou nabíjecí stanice by snížily po několika minutách nabíjecí proud. Nabíjecí stanice s kapalinou chlazeným kabelem musí navíc obsahovat pumpu, která zajišťuje cirkulaci, a chladič kapaliny, kde se teplo vzniklé ve vodičích a přenesené kapalinou odevzdá do okolí. Například pro „klasickou“ nabíjecí stanicí DC 50 kW s nejvyšším proudem 125 A se využívají pasivně chlazené kabely s průřezem vodičů 50 mm².

4.6.7.Modulární koncepce výkonových modulů

Nabíjecí stanice mívají modulární koncepci výkonové části, to znamená, že jsou složeny z modulů, které konvertují střídavý proud na stejnosměrný. Jsou zapojeny paralelně, takže každý z modulů dodává do baterie část proudu. V případě poruchy jednoho modulu, ty další dále fungují a poškozený se dá snadno vyměnit. Některé stanice jsou koncipovány tak, že umí rozdělit výkon mezi více konektorů pro případ, že je připojeno více vozidel, anebo dodávat plný dostupný výkon, pokud je zapojeno jen jedno vozidlo.

V České republice je nejčteněji zastoupena stejnosměrná veřejná nabíjecí stanice o výkonu alespoň 50 kW, kterých je už přes 300. Z toho stanic s výkonem alespoň 75 kW je přes 60 a s výkonem alespoň 150 kW je přes 30 a další přibývají každý týden.

4.6.8.Připojení nabíjecí stanice do sítě

Nabíjecí stanice jsou připojeny do elektrické rozvodné sítě celkem překvapivě ne na nějaké vyšší hladině napětí, třeba 22 kV, ale přes klasickou distribuční hladinu 400 V. Například klasická nabíjecí stanice s DC výstupem 50 kW a AC výstupem 22 kW potřebuje rezervovaný příkon 77 kVA [13]. To znamená proud na každé fázi 112 A. Ještě mnohem větší nároky má kupříkladu stanice s výstupem 350 kW, ta vyžaduje napájení větším napětím AC 480 V [14](sdužené napětí 480 V, napětí mezi L a N je tedy $480 \text{ V} / \sqrt{3} = 277 \text{ V}$, to je napětí, které nabíjecí stanice umí zužitkovat) a rezervovaný proud z každé fáze tedy vychází $350 \text{ kW} / (277 \text{ V} \cdot 3) = 422 \text{ A}$.

4.6.9. Autorizace uživatele před nabíjením a platební metody

Pokud zrovna není nabíjecí stanice přístupná zdarma, je potřeba, aby se zákazník před použitím nějakým způsobem autorizoval. Nejčastěji používaná metoda je autorizace pomocí RFID karty registrovaného uživatele, vydanou provozovatelem nabíjecí sítě nebo roamingové služby. Alternativu představuje také spuštění přes mobilní telefon (aplikací, přes web, zavoláním na číslo). Oba tyto přístupy vyžadují registraci předem u daného provozovatele nabíjecích stanic nebo u roamingové služby.

Zaplatit za nabíjení jako zákazník bez registrace lze buď on-line platební metodou, nebo ve vzácnějších případech terminálem na platební karty na nabíjecí stanici. V takovém případě se na platební kartě zablokuje určitá částka a po ukončení nabíjení se vrátí rozdíl v ceně mezi zablokovanou částkou a částkou za spotřebovanou energii.

Nejkomfortnější způsob autorizace je ten, kde není potřeba žádná RFID karta ani mobilní aplikace, ale vozidlo a nabíjecí stanice si samy vymění identifikátory, například veřejné klíče (PKI – *public key infrastructure*) [15]. Nabíjecí síť Tesla Supercharger tím, jak je uzavřená jen pro jednoho výrobce, tímto komfortem disponuje už od počátku. Pro ostatní je nadějná změna do budoucna ve formě standardu ISO 51118, který zavádí mimo jiné funkci *Plug & charge*. Pokud bude vozidlo, stanice i její provozovatel tuto funkci podporovat, bude pouze stačit při registraci u provozovatele nabíjecí infrastruktury uvést identifikátor vozidla a při každém připojení proběhne automaticky identifikace a nabíjení bude spuštěno.

4.6.10. Cena

Cena za stejnosměrné nabíjení je zpravidla vyšší než za nabíjení střídavým proudem. Důvod je zřejmý, zatímco u střídavého nabíjení provozovatel potřebuje pouze zásuvku, RFID čtečku, relé a ovládací elektroniku s komunikací, tak pro dodání stejnosměrného proudu přímo do vozidla je potřeba dražší usměrňovací výkonová elektronika, větší rezervovaný příkon ze sítě ale i silnější kabely. Navíc cena za nabíjení zpravidla roste i s výkonem, který je stanice schopná dodat. V České republice se ceny za AC nabíjení pohybují od 4,9 Kč/kWh do 10 Kč/kWh. Vynechávám nabíjení zdarma, které je někdy dostupné u obchodů, restaurací a hotelů. Cena za DC nabíjení výkonem až 75 kW je od 6 Kč/kWh do 13 Kč/kWh a za DC nabíjení výkonem až 350 kW se ceny pohybují mezi 8 Kč/kWh a 21 Kč/kWh. Uvedené ceny jsou buď pro neregistrované uživatele, nebo pro registrované uživatele u daných provozovatelů, kde registrace je maximálně za 20 Kč a neplatí se žádné stálé měsíční poplatky. S tarify se stálým měsíčním poplatkem (předplacenými kWh) je cena nižší.

5. Návrh obvodového zapojení

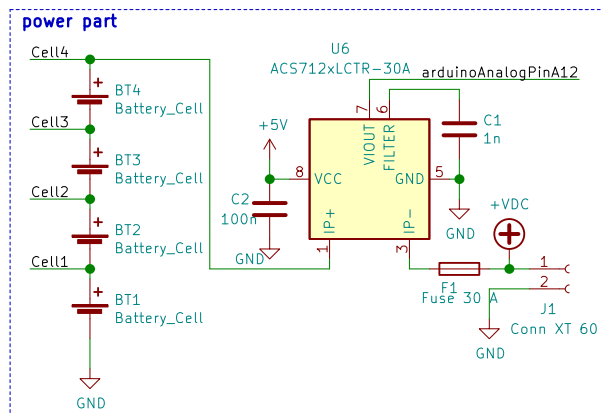
V této kapitole bude popsán postup návrhu modelu managementu nabíjecího a vybíjecího procesu akumulátoru elektromobilu. Nejdříve bude rozebráno obvodové zapojení, jeho vlastnosti a funkce a vysvětleny jednotlivé dílčí bloky, ze kterých se skládá.

5.1. Kreslení schématu

Ke kreslení schématu byl použit program KiCad. Během práce bylo potřeba dávat pozor nejen na logické číslování součástek, ale také na přiřazení správné fyzické reprezentace součástky pro pozdější umístění na desku plošných spojů (schéma uvedeno v příloze 12.2).

5.2. Výkonová část

První součástky umístěné do schématu byly články baterie. Pro názornost dějů v akumulátoru byla vybrána konfigurace čtyř článků v sérii a vždy jen jeden článek paralelně. Čtyři články v sérii budou zajímavé pro sledování práce balancovacích obvodů, zvýší výstupní napětí a zároveň při použití nejlépe dostupného rozměru Li-ion článků 18650 bude mít přípravek rozumnou velikost a hmotnost. Neboť použití dvou nebo více článků paralelně by sice zvýšilo kapacitu a maximální možný odebíraný proud, ale jinak by nevedlo k žádným zajímavým projevům ke sledování.



Obr. 11: Schéma výkonové části

Akumulátor, který byl vytvořen, se dá podle konvence označit jako 4S1P. Po rozhodnutí o počtu článků v sérii a počtu článků paralelně byly do schématu umístěny jako první články. Po nich přišel do trasy relativně větší proud držák automobilové pojistky, a konečně konektor XT60. Konektor XT60 je běžně používaný v modelářství, pro elektrické koloběžky, hoverboardy, elektrické longboardy a pro podobné aplikace s nižším stejnosměrným napětím a relativně vyššími proudy, snese proud až 60 A konstantně. Automobilová pojistka v řetězci funguje jako dodatečný prvek zvýšení bezpečnosti. V případě zkratu nebo jen zvýšeného proudu na výstupních svorkách se za určitý čas přepálí. Automobilová pojistka má tu výhodu, že jde o velmi běžný artikl, který se vyrábí pro velké množství jmenovitých proudů. Uzel za pojistkou byl ve schématu označen jako kladný stejnosměrný referenční uzel, na který je poté odkazováno na jiných místech ve schématu. Poté byl proveden průzkum trhu na poli ampérmetrů, které se dají použít ve spojení s vyhodnocením mikrokontrolérem.

5.3. Převodník proudu na napětí

Jako velmi vhodný se ukázal integrovaný obvod ACS-712 od firmy Allegro. Jde o snímač proudu založený na principu Hallova jevu v pouzdru o půdorysu pouhých 4,9 mm na 3,9 mm. Je bidirekcionální, což se s výhodou využije pro měření proudu z/do baterie při nabíjení a vybíjení. Nejvyšší verze snese proud až ± 30 A, což přesahuje schopnosti článků, takže netvoří pomyslné úzké hrdlo v řetězci. Je napájen 5 V z mikrokontroléru. Blízko Vcc pinu je dále umístěn blokovací kondenzátor sloužící jako zdroj náboje pro integrovaný obvod, v případě, že by například potřeboval rychle zvýšit napětí na výstupním pinu a odpor cesty z 5 V mikrokontroléru by tuto rychlou změnu znemožňoval. Kromě toho tento blokovací kondenzátor značně eliminuje vliv rušení na napájecím pinu. Výstupní napětí při proudu 0 A je 2,5 V (tj. $V_{cc}/2$), a dále se zvyšuje nebo snižuje podle proudu protékajícího senzorem dle výrobcem udané převodní konstanty. Výstupní pin převodníku proudu na napětí je napojen přímo na analogový pin Arduina.

5.4. Měření napětí článků v sérii mikrokontrolérem

Dalším úkolem při tvorbě schématu bylo najít způsob, jakým by se dalo měřit napětí jednotlivých článků v sérii s využitím mikrokontroléru. S měřením prvního článku v sérii není problém, ten dosahuje napětí v rozsahu 2,8 V až 4,2 V, což se dá měřit přímo mikrokontrolérem, který podporuje napětí 0 V až 5 V. Věci začínají být komplikovanějšími s druhým a dalšími články v sérii, napětí na kladných terminálech článků přesahují limity AD převodníku mikrokontroléru. Případné možnosti řešení jsou rozebrány dále.

5.4.1. Využití odporového děliče

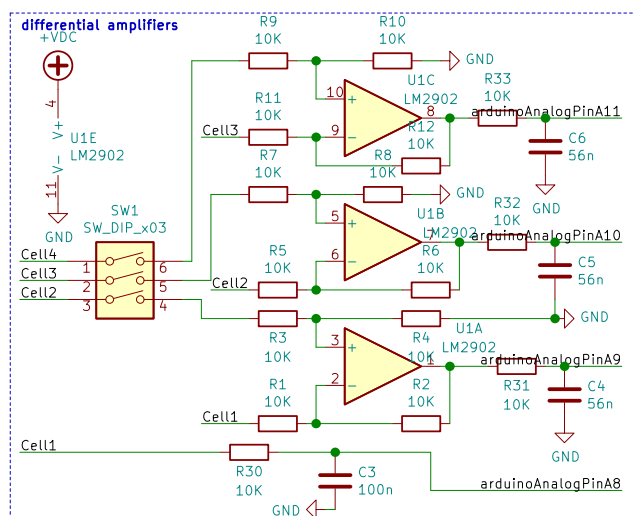
Nejjednodušší variantou by bylo použití odporových děličů. Například pro kladný terminál druhého článku by se použil odporový dělič $R + R$. Mikrokontrolér by naměřil poloviční napětí, než které je ve skutečnosti mezi kladným terminálem druhého článku a referenčním uzlem GND. Pro zjištění napětí druhého článku je potřeba nejdřív vynásobit dvěma hodnotu napětí na odporovém děliči a poté odečíst napětí prvního článku. Pro měření napětí na třetím článku by už musel být použit odporový dělič $2R + R$, AD převodník mikrokontroléru by naměřil třetinové napětí, než ve skutečnosti je mezi kladným terminálem třetího článku a referenčním uzlem GND. Pro zjištění napětí na třetím článku by bylo potřeba naměřené napětí vynásobit třemi a odečíst napětí prvního a druhého článku. Jak si už lze

povšimnout, každý další článek v sérii se na měřeném napětí podílí už pouze 1/2, 1/3 atd., analyticky vyjádřeno 1/N, kde je N je index článku – kolikátý je to článek v sérii od referenčního zdroje GND. To znamená, že s touto metodou klesá rozlišení měření napětí u vyšších indexů článků. Výhoda je, že pro každý další článek v sérii jsou potřeba jen 2 rezistory.

5.4.2. Zapojení s diferenčními zesilovači

Způsob, který byl zvolen, je využití diferenčních zesilovačů. Toto zapojení využívá vlastnost operačních zesilovačů, snažit se udržet na svých dvou vstupech stejné napětí. Pro vytvoření diferenčního zesilovače pro jeden článek je potřeba operační zesilovač a 4 rezistory, což je více komponent než pro způsob v předchozím odstavci, ale jinak toto zapojení přináší samé výhody. Napětí na výstupu operačních zesilovačů je v rozsahu, se kterým je schopen mikrokontrolér pracovat. A problém se zhoršením rozlišení pro vyšší indexy článků zde není přítomen.

Konkrétní operační zesilovač, který byl použit má označení LM2902, zahrnuje v jednom pouzdru 4 operační zesilovače z bipolárních tranzistorů. Pro tuto aplikaci byly použity pouze 3, čtvrtý zůstal nezapojen, protože první článek se může připojit na analogový vstup Arduino přímo. Integrovaný obvod s operačními zesilovači je napájen z uzlu označeného jako kladná stejnosměrná reference. Protože výstupní napětí z článků je velmi pomalu se měnící stejnosměrné napětí, byl na výstupu z operačních zesilovačů s výhodou použit RC článek, který přispěl ke zvětšení odolnosti proti rušení a navíc rezistor 10 kΩ mezi článkem nebo výstupem operačních zesilovačů a pinem konektoru funguje jako ochrana proti případnému nechtěnému zkratu. V celém schématu, pokud to bylo možné, byla použita hodnota rezistoru 10 kΩ, to přineslo benefity jako možnost výhodně nakoupit rezistory ve větším množství a u operačního zesilovače zesílení rovno jedné, a tudíž naměřená hodnota se nemusí přepočítávat. Protože je součástí zapojení diferenčního zesilovače větve s dvěma rezistory v sérii mezi článkem a referenčním uzlem GND, přes které by neustále tekla proud, a články by se vybíjely, byl do schématu umístěn spínač, kterým je možno tuto cestu v případě, že se přípravek nepoužívá, rozpojit.

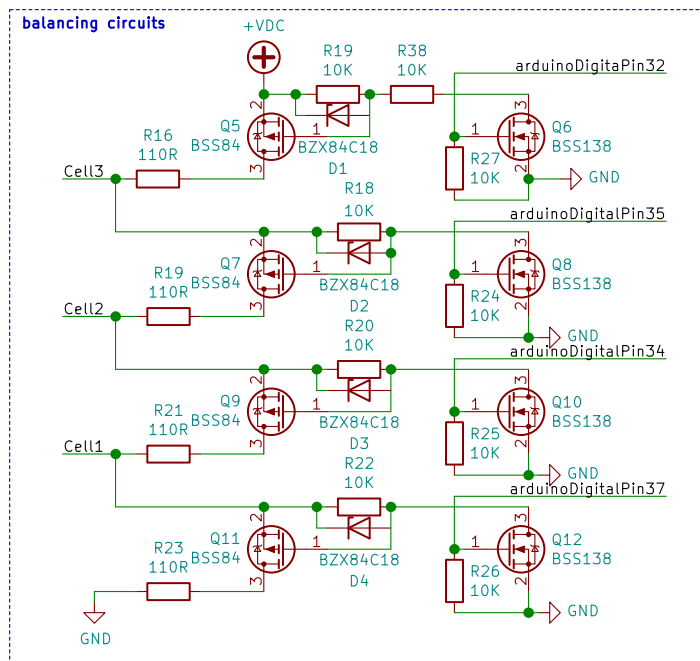


Obr. 12: Schéma zapojení diferenčních zesilovačů

5.5. Balancovací obvody

Další podle funkce rozdělený blok na schématu (viz příloha 12.2) jsou balancovací obvody. Ty jsou, po obvodech pro měření napětí článků, druhou nejdůležitější částí pro správu Li-ion článků. V podstatě sestávají z MOSFETů (ve schématu například Q5) fungujících jako spínače vybíjení jednotlivých článků přes rezistor. Ovládání sepnutí vybíjení jednotlivých článků je řízeno mikrokontrolérem, takže přesný algoritmus balancování může být změněn přeprogramováním. Právě aby šlo balancování řídit mikrokontrolérem, který má na svém výstupu při logické 1 napětí 5 V, musí být každý spínač vybíjení doplněn ještě druhým MOSFETem s N kanálem (ve schématu například Q6) fungující jako *level shifter*. Pro úplnost uvedu, že MOSFET s N kanálem je sepnut kladným napětím *gate-source* a MOSFET s P kanálem je sepnut záporným napětím *gate-source*. MOSFET s N kanálem má *gate* spojen s digitálním pinem Arduino a dále je přes 10 kΩ *pull-down* rezistor spojen s referenčním uzlem GND pro odstranění případného náboje na pinu gate, který by mohl způsobit nepředvídatelné chování

tranzistoru. Toto zapojení využívá základní charakteristiky MOSFET tranzistorů s N kanálem, pokud je napětí *gate-source* větší než například 2,5 V, je cesta *drain-source* vodivá, pokud je napětí *gate-source* 0 V, je cesta *drain-source* nevodivá. MOSFET s P kanálem (ve schématu například Q5) je zapojen pinem *source* na kladný pól článku, vývodem *drain* pak na rezistor (například R16), přes který se článek vybíjí. Mezi vývody *source* a *gate* se nachází rezistor (například R19), na něm je v případě, že MOSFET s N kanálem je vodivý, napětí $U_{gs} = -(U_{cell3})$, což zase otevře MOSFET s P kanálem (ve schématu Q7) a dochází k vybíjení článku 3. V případě, že je MOSFET s N kanálem (například Q8) nevodivý, rezistorem (například R19) mezi G a S neteče žádný proud a je na něm nulové napětí. MOSFET s P kanálem (například Q7) je v takovém případě nevodivý a článek není vybíjen proudem.



Obr. 13: Schéma balancovacích obvodů

Ovládání balancovacích obvodů mikroprocesorem je tedy celkem jednoduché, když je výstup z Arduina v logické 1, dochází k vybíjení, když v logické 0, k vybíjení nedochází. Taková charakteristika je nezbytně nutná, jinak by v případě, že je přípravek odpojen od mikrokontroléru, docházelo k vybíjení článků. Při současném návrhu se při rozpojeném vstupním konektoru, případný náboj z pinu *gate* vybije přes *pull-down* rezistor (například R25), MOSFET s N kanálem (například Q8) bude nevodivý, napětí na rezistoru R18 bude 0 V, a tedy i MOSFET s P kanálem Q8 bude nevodivý.

Pro dodatečnou ochranu před ESD (*electrostatic discharge*, elektrostatickým nábojem), který by snadno mohl zničit oxidovou vrstvu na vstupu *gate*, která má pouze několik desítek nanometrů, jsou přidány diody, které „orežou“ případné napěťové špičky. U tranzistoru Q5 byl navíc z důvodu, že pracuje s největším napětím na přípravku, přidán odporový dělič (ve schématu je tvořen R19 a R38), aby pracoval s napětím více srovnatelným s ostatními tranzistory. Poloviční napětí $V_{DC}/2$ stále tranzistor spolehlivě otevře, a navíc je alespoň dosaženo větší rezervy mezi napětím na Zenerově diodě (ve schématu D1) a napětím U_{zn} , které je v případě použité Zenerovy diody BZX84C18 rovno 18 V.

5.6. H-můstek

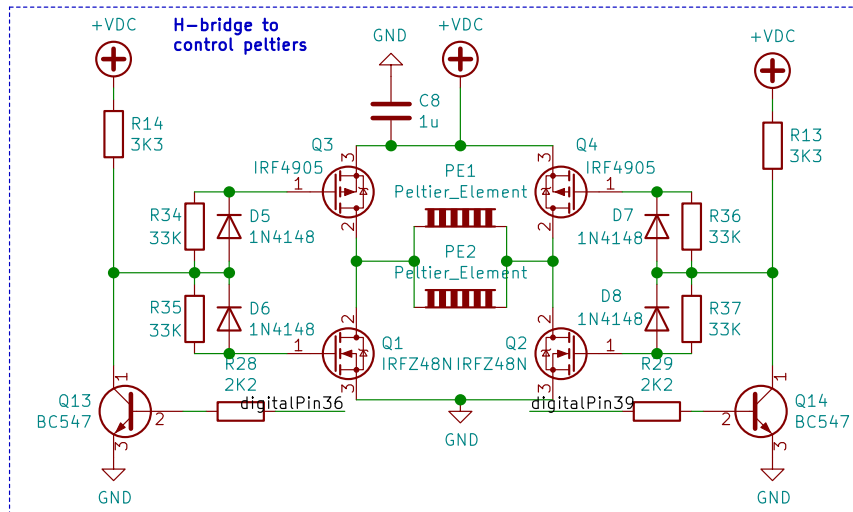
Ke chlazení a ohřívání článků jsou na přípravku použity Peltierovy články. Pro změnu polarity napájení Peltierových článků je použit H-můstek, který změní mód fungování na ohřev nebo na chlazení. V tomto případě je H-můstek tvořen dvěma komplementárními páry MOSFET s N kanálem a P kanálem. Pro ovládání MOSFETů slouží bipolární tranzistor BC547B (ve schématu například Q13) ve spojení s rezistorem (ve schématu například R14) tvořící *level shifter*, který přivede na piny *gate* buď GND nebo V_{DC} . Ovládání bipolárního tranzistoru řídí digitální pin Arduina a proud je omezován rezistorem (například R28). Proud tekoucí z digitálního pinu Arduina do báze se vypočítá následujícím vztahem:

$$I_b = \frac{U_{log1} - U_{be}}{R_b} = \frac{5 - 0,7}{2,2 \cdot 10^3} = 1,95 \text{ mA} \quad (4)$$

Pokud má bipolární tranzistor BC547B minimální proudové zesílení $\beta = 200$, pak při takovémto proudu bázi může být teoreticky proud kolektorem $I_c = 390 \text{ mA}$ (avšak výrobcem povolené maximum podle datasheetu je 100 mA). Pokud budu počítat, že je tranzistor úplně otevřený a $R_{14} = 3,3 \text{ k}\Omega$, pak maximální možný proud, co poteče kolektorem, bude při plném nabití článků baterie $U_{DC} = 16,8 \text{ V}$:

$$I_{c,max} = \frac{U_{DC}}{R_{14}} = \frac{16,8}{3,3\text{k}} = 5 \text{ mA} \quad (5)$$

Což je s rezervou menší než maximální vypočtený proud pro zesílení $\beta = 200$ a maximální výrobcem povolený proud kolektorem. Všechny obvody H-můstku jsou napájeny z referenčního uzlu V_{DC} , takže jsou až za pojistkou, což je lepší z hlediska bezpečnosti, pokud by došlo ke zkratu. U pinu *source* MOSFETů s P kanálem se nachází blokovací kondenzátor, který slouží jako rychlý zdroj náboje. Komplementární páry MOSFETů s P a N kanály a všechny dodatečné komponenty na pravé a levé straně schématu jsou totožné.



Obr. 14: Schéma zapojení H-můstku

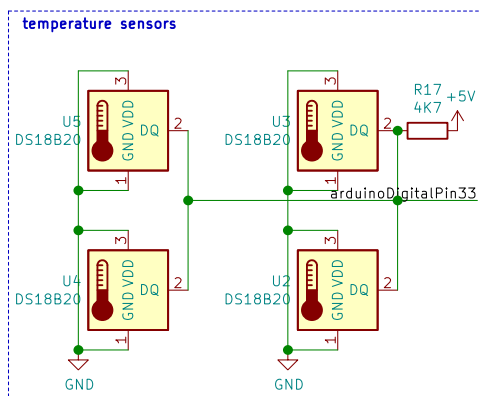
5.7. Teplotní čidla

Poté jsem se zaměřil na výběr vhodných teplotních čidel. Jako první byla zkoumána čidla využívající termoelektrického jevu. Velmi používané jsou termočlánky s charakteristikou K, které se dají použít k měření teplot v rozsahu alespoň $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ až $260 \text{ }^\circ\text{C}$, ale velmi často v ještě větším rozsahu. Pro vyhodnocení teploty a odeslání informace by musel být termočlánek doplněn nějakým vyhodnocovacím obvodem s komunikačním rozhraním. Jako příklad lze uvést obvod MAX6675 pro termočlánky typu K s komunikačním rozhraním SPI.

5.7.1. Integrovaný obvod DS18B20

Když už probíhalo hledání vhodného senzoru pro měření teploty, bez opomenutí nesměl zůstat ani integrovaný obvod DS18B20 od výrobce Maxim Integrated, dříve od výrobce Dallas Semiconductor corp., proto je na něj často referováno jako na „Dallas“. Tento senzor v jednom pouzdru sdružuje samotné čidlo teploty i komunikační rozhraní přes 1-Wire sběrnici. Lze ho použít k měření teplot v rozsahu $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ až $125 \text{ }^\circ\text{C}$ s nastavitelnou přesností 9 až 12 bitů. Vyrábí se v pouzdru TO-92. Pro připojení k mikrokontroléru se využije zmíněná 1-Wire sběrnice a čidlo se dá provozovat v režimu tzv. parazitního napájení, kdy je připojeno pouze dvěma vodiči, datovým vodičem (DQ) a GND. energii pro provoz si integrovaný obvod uchovává v kondenzátoru na čipu, který je nabíjen vždy, když je sběrnice v logické 1. Pro napájení lze alternativně využít i třívodičové zapojení s datovým, GND a napájecím vodičem, ale reálně to nepřináší žádné výhody oproti parazitnímu napájení. Každé čidlo má svou vlastní unikátní z výroby danou 64bitovou adresu, a tudíž se dá použít na jedné sběrnici více čidel. Všechny vyjmenované přednosti potvrdily, že jde o velmi vhodný senzor teploty pro tuto aplikaci. Ve schématu použité zapojení využívá parazitní napájení. Vývody GND a VDD senzorů jsou spojeny s uzlem GND přípravku, vývody DQ všech čtyř senzorů jsou spojeny v jednom uzlu a vedou na digitální pin Arduina, tento uzel je dále přes *pull-up* rezistor $4,7 \text{ k}\Omega$ (ve schématu R17) spojen s $+5\text{V}$ napájením z Arduina

Mega. Díky tomu mohou být senzory napájeny s jakýmsi předstihem, když je digitální pin mikroprocesoru ve stavu vysoké impedance a žádná aktivita ještě na sběrnici neprobíhá.



Obr. 15: Zapojení teplotních čidel DS18B20

6. Návrh desky plošných spojů

První návrhy možné podoby přípravky byly načrtnuty na papír, už tyto návrhy měly koncepci „shieldu“ který se dá nasunout na Arduino Mega, a na přípravek dále nasunout displej pro zobrazování všech důležitých informací o akumulátoru. Čtyři články akumulátoru jsou na DPS umístěny ve vyřezaných otvorech, kam se položí. Vodičivě i mechanicky budou spojeny pomocí poniklovaných pásků.

K návrhu desky plošných spojů byl použit program KiCad, postup práce byl následující:

1. Z existujícího schématu byl vyexportován soubor *netlist*, ten popisuje, jaký vývod jedné součástky je vodičivě spojen s konkrétním vývodem další součástky. Soubor *netlist* byl následně načten v části programu pro návrh PCB, tím se naznačily půdorysy součástek a jejich vyžadované propojení.
2. Při designování desky byl kladen důraz na dodržování návrhových pravidel, jako je co možná nejkratší délka cesty, dostatečná šířka spojů, které budou vystaveny vyšším proudům, co možná nejkratší možná délka cest u signálových spojů, rozdílná cesta pro nabíjecí a vybíjecí proud z kondenzátorů, a podobně.
3. Pokud to šlo, tak byly použity SMD součástky velikosti 0805 v imperiálních jednotkách.

6.1. Výkonová část

Asi nejviditelnější součástky jsou články, pro ty byla na DPS použita součástka z knihovny KiCadu – držák cylindrických článků rozměru 18650. Tato součástka z knihovny byla poupravena, byl o trochu zmenšen půdorys, změněny natištěné obrazce (*silkscreen*) a SMD plošky pro pájení byly nahrazeny oválnými THT otvory pro připájení poniklovaných pásků. Všechny cesty, kde bude protékat relativně vysoký proud byly navrženy jako vyplněné oblasti, podle pravidla, čím větší plocha, tím lépe. Převodník proudu na napětí byl umístěn do prostoru mezi články a držák pojistky, je celkem pozoruhodné, že dvě nožičky paralelně pouzdra SOP 8 snesou kontinuálně proud 30 A. Blokovací kondenzátory byly umístěny co možná nejbliže k IO. Další přidanou součástkou byl držák pojistky, znovu byla nejprve použita součástka z knihovny, která byla lehce poupravena, byly změněny rozměry a posunuty oválné THT otvory, které jsou relativně hodně vyosené, pravděpodobně z důvodu umístění přítlačných per konektoru. Poslední součástkou výkonové části je XT60 konektor, což je součástka z knihovny, tady nebyl žádný problém.

6.1.1. Chyba při návrhu

K chybě při návrhu došlo při umísťování konektoru XT60 na desku plošných spojů. Později se ukázalo, že nasazený displej shield a konektor XT60 spolu kolidují. Řešení představuje umístění 10 cm dlouhého vodiče o průřezu 12 AWG (přibližně 3,3 mm²), který je na jednom konci připájen pod úhlem do otvorů po zamýšleném konektoru XT60 a na druhé straně napájen na zmiňovaný konektor, a tím se řeší problém s místem pro tyto dva komponenty.

6.2. Zapojení obvodů pro měření napětí mikrokontrolérem

Jako první byl umístěn integrovaný obvod s operačními zesilovači, k němu přivedeno napájení. Doplňkové rezistory tvořící rozdílový zesilovač byly umístěny co možná nejbliže k IO. Cesta ke snímání

napětí jednotlivých článků byla vedena zvlášť, mimo cestu relativně velkého proudu, aby nebylo měřeno napětí článků snížené o úbytek napětí na odporu cesty, kudy teče relativně větší proud. Problém by to byl hlavně u uzlu ve schématu označeném jako Cell4. Aby nedocházelo k vybíjení článků přes 2·10 kΩ rezistor mezi kladnými terminály článků a zemí, je tato cesta vedena přes spínač. Tento spínač je fyzicky realizovaný jako DIP spínač s třemi cestami paralelně. Jako zajímavost lze uvést, že DIP přepínač pro 3 cesty je pravděpodobně celkem raritní součástka a stojí více než pro 4, nebo i dokonce pro 8 cest. Kondenzátory na výstupu operačních zesilovačů jsou umístěny co možná nejbliže k analogovým pinům mikrokontroléru.

6.3. Balancovací obvody

Další částí jsou balancovací obvody, ty sestávají z MOSFETů, rezistorů a diod, které byly do schématu přidány až později, a proto pro ně bylo vyčleněno místo až dodatečně. Vybíjecí proud se vypočte:

$$I_{vyb} = \frac{U_{cell}}{R} = \frac{4,2}{110} \cong 38 \text{ mA} \quad (6)$$

A tedy výkon na rezistoru se rovná:

$$P_{vyb} = U_{cell} \cdot I_{vyb} = 4,2 \cdot 38 \cdot 10^{-3} = 160 \text{ mW} \quad (7)$$

Obvykle lze na rezistoru SMD rozměru 0805 přeměnit na teplo 1/8 W, což je 0,125 W, méně, než kolik bylo vypočteno, že je pro balancování potřeba. Proto jsou rezistory o hodnotě 110 Ω (ve schématu R16, R19..) většího rozměru SMD 1206 imperiálních jednotek, které snesou výkon až 1/4 W což je 0,25 W.

6.4. H-můstek

Pro návrh fyzické realizace H-můstku bylo potřeba vybrat MOSFET tranzistory, které mají přijatelně malý odpor kanálu v sepnutém stavu $R_{DS(on)}$, aby se daly provozovat na desce plošných spojů bez chladiče. Takže použitý MOSFET s P-kanálem IRF4905 má odpor pouze 20 mΩ, ale jeden kus stojí 44 Kč. Na druhou stranu MOSFET s N-kanálem IRFZ48N, který má odpor 14 mΩ byl pořízen pouze za 25 Kč. Možné vysvětlení takového rozdílu cen je, že pohyblivost děr je přibližně 3krát menší než elektronů. Výkonová ztráta na MOSFETu ve vodivém stavu se například podle [16] dá při dosažení nejméně příznivých hodnot, většího ze dvou odporů kanálu (20 mΩ) a proudu $I_{Drms} = 5 \text{ A}$ vypočítat podle vztahu:

$$P_{CM} = \frac{1}{T_{SW}} \int_0^{T_{SW}} P_{CM}(t) dt = \frac{1}{T_{SW}} \int_0^{T_{SW}} (R_{DSon} \cdot i_D^2(t)) dt = R_{DSon} \cdot I_{Drms}^2 = 0,02 \cdot 5^2 = 0,5 \text{ W} \quad (8)$$

V datasheetu MOSFETu IRF4905 je pro ověřování toho, zda se dá takto tranzistor provozovat důležitý parametr *Junction-to-Ambient*, který je 62 °C/W. Z toho plyne, že se tranzistor při vyřazování výkonu 0,5 W do okolí bez přidaného chladiče ohřeje o 31 °C, což je přípustné. Během praktikování této metody nesmí docházet k umístování více MOSFETů příliš k sobě, protože jinak si navzájem zvyšují okolní teplotu a dochází k většímu ohřevu. I když každý článek má svůj vlastní teplotní senzor (aby se dal najít článek s nejvyšší nebo nejnižší teplotou a podle toho řídit chování přípravku), tak H-můstek je pro celý přípravek jen jeden. Z toho plyne, že se nedá řídit ohřev nebo chlazení každého ze článků zvlášť, ale jen všechny čtyři dohromady. Praktická realizace by musela obsahovat 16 MOSFETů jen na H-můstky, to by přineslo těžký, drahý a komplikovanější výrobek s pouze zanedbatelným benefitem. I v reálných elektromobilech se chladí nebo ohřívá celý akumulátor najednou, soustava ventilů nebo klapky by zvyšovala cenu, hmotnost a složitost.

Dále při simulaci v programu LTspice byla potvrzena obava, že přes tranzistory poteče při spínání příliš velký proud. K tomuto jevu sice dochází po krátkou dobu, když je na pinech *gate* tranzistorů napětí okolo $V_{CC}/2$, ale i za tuto dobu může být v objemu tranzistoru uvolněna energie, která by ho mohla poškodit. Proto byla navržena úprava, která tento jev omezuje. Přidání diod před piny *gate* tranzistorů zajistí rozdílné napětí v okamžiku přepínání, a tedy to, že oba tranzistory nebudou vodivé zároveň. Při simulaci byla zjištěna energie přeměněná na teplo v tranzistorech během 5 cyklů přepínání

polarity na nezatíženém H-Můstku před úpravou 90,5 mJ a po úpravě 676 nJ. To je citelné zlepšení o 5 řádů. Špičkový proud klesl z 50 A na pouhých 11 mA. Z toho mimo jiné plyne, že je výhodnější, pokud se bude k ovládání Peltierových článků používat, mít menší frekvenci PWM, protože pak nedochází k takovým ztrátám při spínání. K vybití náboje kapacity gate slouží rezistory 33 kΩ. Při vybírání MOSFET tranzistorů byl samozřejmě brán ohled i na další parametry, hlavně na U_{GS} a U_{DS} alespoň 20 V a I_D alespoň 5 A. Protože cesty napájející Peltierovy články budou zatěžovány proudem až 2 A, byly k maximalizaci jejich plochy ve většině délky použity „rozlité“ plochy mědi.

Posledním krokem bylo vyexportování dat pro výrobu a jejich zaslání výrobcí. Deska plošných spojů byla vyrobena u výrobce JLCPCB.

7. Fyzická kompletace modelu

Po obdržení desky plošných spojů a nákupu ostatních součástek bylo dalším krokem fyzická kompletace modelu.

7.1. Pájení

K pájení SMD součástek byla použita pájecí pasta s označením RL-403 s obsahem 63 % cínu a 37 % olova a vypůjčená horkovzdušná pistole. Pájecí pasta se dodává ve stříkačce a s pomocí jehly se dá přesně dávkovat na plošku, kde chceme provést pájený spoj. Dále se volitelně přidá *soldering flux*, česky tavidlo, které zajistí, že se pájka lépe rozleje po kontaktech součástky a desky plošného spoje a spoj je lesklý, vizuálně hezčí. Konkrétní gelové tavidlo, které jsem použil má označení RMA-218. Teplota vzduchu vycházejícího z horkovzdušné pistole byla okolo 280 °C a celý proces šel hladce, součástky se pájecí pastou dostatečně přilepily k desce plošných spojů, takže je proud vzduchu neodfoukl a po několika vteřinách proudění horkého vzduchu se pájecí pasta změnila z formy kuliček do jednolitého kusu pájky a vytvořila tak trvalé vodivé propojení. Vždy byla připravena pájecí pasta na plošky kontaktů a umístěna na pozici alespoň deset součástek najednou předtím, než byla zapnuta horkovzdušná pistole a postupně namířena na všechny kontakty, aby nedocházelo k přílišnému namáhání opakovaným ohříváním a ochlazováním desky plošných spojů a k možnému poškození.

K pájení THT součástek (*through hole technology*) byla použita trubičková bezolovnatá pájka s obsahem 99 % cínu, 0,7 % mědi a 0,3 % stříbra. Použití bezolovnaté pájky vedlo k potřebě použít lehce vyšší teplotu pájení než u olovnaté pájky. Jako zvlášť náročné se ukázaly spoje, které mají ve svém okolí velké plochy mědi, odkud se teplo z hrotu páječky rychle přenáší do okolí. Jmenovitě téměř všechny spoje u uzlu GND a kladného terminálu čtvrtého článku bylo nemožné dostatečně prohrát s pájecí stanicí Parkside PLSD 48 A1 a vytvořit tak kvalitní pájený spoj. Mnohem lepších výsledků se podařilo dosáhnout s pájecími hroty ze série Hakko T12, pro které tyto spoje s vazbami na velké plochy mědi nepředstavovaly nějakou větší výzvu a zvládly vytvořit kvalitní a pěkně vypadající pájené spoje.

7.2. Svařování

Pro spojení bateriových článků se použilo poniklovaných pásků a svařování. Články byly spojeny spolu navzájem aby tvořily již zmíněnou 4S1P baterii, a ještě k tomu jsou spojeny s deskou plošných spojů. Pro svařování byla využita bodová svářečka přímo pro bateriové články s označením JST-IIS. Tato svářečka je uvnitř složena v podstatě pouze z transformátoru a relé a v momentě, kdy je relé sepnuto odebírá ze sítě příliš velký proud a „vyhazuje“ některé jističe. Svářečky, které obsahují nějaký akumulární prvek se s tímto problémem nepotýkají. Naštěstí se dá u JST-IIS nastavit proud i délka pulzu, takže lze zkoušením nalézt největší hodnotu, která ještě jistič „neshodí“. Je také vhodné používat svářečku na okruhu jištěném jističem o větší hodnotě a s pomalejší vypínací charakteristikou. V mém případě přijatelně fungoval starý „bakelitový“ jistič SEZ na 16 A, ke kterému by se dnes dala přiřadit vypínací charakteristika B. K zvýšení komfortu při práci je svářečka dodávána s pedálem ke spouštění svařování.

Použitý poniklovaný pásek má tloušťku 0,1 mm a šířku 8 mm. Před započítím svařování byly jednotlivé kousky pásky změřeny a ustříženy na rozměr. Pro proudově namáhanější spoje, tj. pro uzel GND a pro kladný terminál čtvrtého článku, byly použity dva pásky paralelně aby bylo dosaženo dvojnásobné tloušťky. Čtyři články byly nejprve mimo přípravek svařeny do finální podoby a poté byly z nich vedoucí poniklované pásky nasunuty do oválných otvorů na desce, a nakonec poniklované pásky připájeny k desce plošných spojů. Vzhled přípravku po dokončení této fáze je zobrazen na Obr. 16.



Obr. 16: Přípravek po spojení s články baterie

7.3. Příprava teplotních čidel DS18B20

Pro umístění teplotních čidel DS18B20 na desku bylo potřeba je připravit tak, aby se daly zapojit k desce plošných spojů jen dvěma vodiči. To znamenalo spojit vodičem piny V_{cc} a GND pouzdra TO-92 a exponované části zaizolovat vzhledem k budoucímu umístění senzorů přímo na články baterie. Články baterie sice jsou obaleny izolační vrstvou, ale stejně je lepší být opatrný, zvláště, když hrozí zkrat mezi póly článků a GND. Dále pak následovalo připájení vodičů k vývodům pouzdra TO-92 a na druhé straně připájení vodičů k desce plošných spojů. Nejprve jsem zkoušel použít vodič – lanko, ale nepodařilo se mi zasunout všechny jednotlivé drátky do otvoru na desce, a tak jsem přešel na použití drátu. Vzhledem k tomu, že se senzor jednou umístí na místo a poté s ním už nebude manipulováno, použití drátu nevádí. Senzor byl k článkům baterie připevněn pomocí teplovodivé pasty Stars-922 a během vytvrzování držten na místě svázaný pomocí nitky, která byla po nějaké době odstraněna.

7.4. Peltierovy články

Ke své správné funkčnosti potřebují Peltierovy články být na té straně, která se dá označit jako ta s teplotou okolí, vybavené chladičem. Protože Peltierův článek je schopen na svých stranách zajistit relativně malý rozdíl teplot (přinejlepším 60 °C až 75 °C), musí být chladič relativně rozměrný. Nedá se totiž spoléhat na velký rozdíl mezi teplotou chladiče a teplotou okolí, kdy tento rozdíl zvyšuje výkon výměny tepla chladiče s okolím.

Použitý chladič je z hliníku s půdorysem se stejnými rozměry, jako je Peltierův článek, 40 mm na 40 mm a výškou 20 mm. Chladič je s Peltierovým článkem spojen teplovodivou pastou Stars-922, která také plní roli mechanického spojení. Před aplikací teplovodivé pasty byly oba povrchy očištěny od mastnot a jiných nečistot izopropylalkoholem.

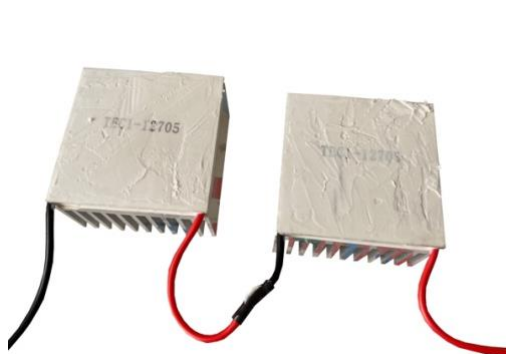
Pokusy bylo zjištěno, že maximální elektrický výkon dodávaný do Peltierova článku, při kterém se chladičem stačí odvádět teplo z teplé strany do okolí, jsou 4 W po dobu prvních 10 minut, během kterých se energie ukládá do tepelné kapacity samotného chladiče, který měl původně pokojovou teplotu. Poté se maximální dodávaný elektrický výkon musí snížit na 1 W. Při větších výkonech než 1 W trvale už nefunguje Peltierův článek, jak je zamýšleno, teplo z teplé strany se už nestihá odvádět do okolí a studená strana už není chladnější než okolí.

Při testech bylo při ponoření chladiče do chladné vody, a tím zlepšení odvádění tepla, dosaženo na chladné straně teplot hluboko pod nulou, což dokazuje vysrážení vzdušné vlhkosti a následné zmrznutí do formy jednolitého kusu ledu. Účinnost výměny tepla chladiče s okolím se dá zlepšit také větráčkem.

Peltierovy články, které jsou použity, mají označení TEC-12705, z čehož se dá vyčíst, že každý obsahuje 127 párů dílčích článků a je dimenzovaný na proud 5 A. TEC pravděpodobně znamená *thermo-electric cooler*. Z destičky vedou dva vodiče, červený a černý k rozlišení polarity, na přípravku bylo z původních 30 cm ponecháno z každého vodiče 5 cm, aby zbytečně nepřekážely (protože články

jsou blízko sebe) a nekazily estetiku. Vodiče byly spájeny k sobě a exponovaná část byla zakryta smršťovací bužírkou se smršťovacím poměrem 2:1.

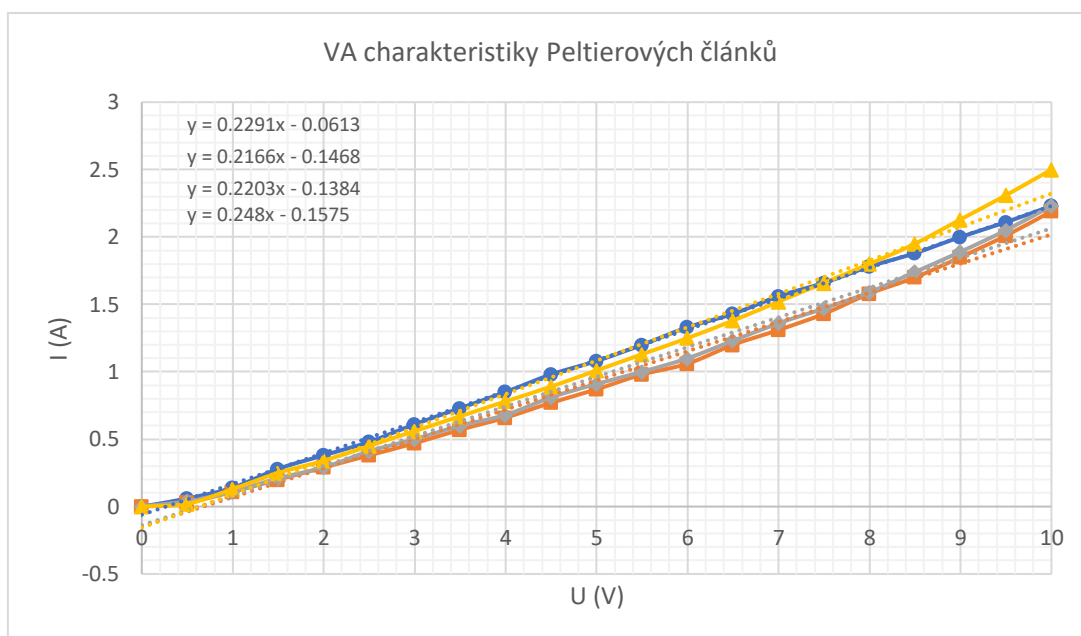
Od původně plánovaného zapojení 2 Peltierových článků v sérii a dvou paralelně bylo upuštěno a bylo rozhodnuto o zapojení 4 článků do série, protože při zapojení dvou článků v sérii na napájení 16,8 V by bylo napětí na jeden Peltierův článek 8,4 V a proud by byl tedy, jak je patrné z voltampérových charakteristik (na Obr. 19) asi 2 A, a tudíž výkon přesahující možnosti chladiče. Voltampérové charakteristiky všech čtyř Peltierových článků jsem změřil po zakoupení a získané průběhy proložil přímkou, která odpovídala směrnici trendu. Z těchto přímek jsem si dále nechal vypsát předpis a z převrácené hodnoty směrnic jsem dostal představu o odporu Peltierových článků. Při zapojení čtyř článků do série vyjde na jeden napětí asi 4,2 V, a tedy proud bude přibližně 1 A, což odpovídá zmiňovanému výkonu 4 W a pro další omezení výkonu bude třeba použít metodu PWM. Peltierovy články budou s články baterie spojeny znovu teplovodivou pastou Stars-922, je důležité, aby teplovodivá pasta pokryla, pokud možno celou plochu Peltierova článku a aby zajistila co největší styčnou plochu s článkem baterie. Jako mechanická podpora celého přípravku, který se na jedné straně zvýšil po přilepení Peltierových článků k Li-ion akumulátorům, slouží 3D tištěný plastový díl. Tento díl byl navržen v programu Blender.



Obr. 17: Peltierovy články s nanesenou teplovodivou pastou



Obr. 18: Články baterie s nanesenou teplovodivou pastou



Obr. 19: Změřené voltampérové charakteristiky čtyř použitých Peltierových článků

7.5. Modifikace vývojového kitu Arduino Mega

Protože je Arduino Mega napájeno výstupním napětím z baterie, které dosahuje až 16,8 V, je lineární stabilizátor napětí na desce více namáhán. Doporučené maximální vstupní napětí lineárního stabilizátoru s označením AMS 1117, který je na desce, je 12 V, avšak absolutní maximum je 18 V, což

je splněno. Už při prvních pokusech dosáhlo pouzdro součástky vysokých teplot. Proto byly na pouzdro postupně doplněny dva hliníkové chladiče. První chladič byl uříznutý kus hliníku, a ten byl spojen se součástkou pomocí teplovodivé pasty. Jako druhý byl na první chladič s pomocí teplovodivé pasty umístěn chladič s povrchovou úpravou tvořenou vrstvou eloxovaného hliníku modré barvy o rozměrech přibližně 2 cm na 2 cm s výškou 1 cm. Díky těmto opatřením se lineární stabilizátor tolik nezahřívá. Největší odběratel proudu z 5V větve je podsvícení LCD displeje, to lze demonstrovat snížením teploty na chladiči poté, co se LCD shield z přípravku sejme.

8. Programování

K programování mikrokontroléru bylo použito vývojové prostředí Arduino IDE. Výhodou je to, že mikrokontrolér na vývojové desce Arduino Mega – Atmega 2560 má relativně velkou paměť na program, což se hodí při množství použitých knihoven v tomto projektu.

8.1. Práce s LCDTFT displejem

První do projektu zahrnutou knihovnou byly knihovny pro řízení LCDTFT displeje. To znamená Adafruit_GFX.h, obecnou knihovnu pro grafiku u celé řady LCD displejů a TftSpfd5408.h knihovnu. Tato knihovna jako jediná fungovala s displejem, který byl použit, protože mu správně přiřazovala piny vývojového kitu. Práce s ní je relativně jednoduchá, přímočará a intuitivní.

Prvotní problém bylo uvědomění si, že když je potřeba například nechat vypsát na displej nový text, je potřeba původní text smazat. To se udělá nejjednodušeji vyplněním celé obrazovky černou barvou, to ale zabere nějaký čas. Proto je efektivní nechat začernit jen tu plochu, kde byl původní text, a to příkazem pro vykreslení vyplněného černého obdélníku. Ještě více vylepšit se dá podobný princip i u kreslení „progressbarů“ nebo také „teploměrů“. Je efektivní nechat vykreslit jen tu část, která přibyla nebo naopak „umazat“ tu část která ubyla, než celý progressbar smazat a pak kreslit celou jeho délku znovu.

Malé zdržení v postupu práce bylo najít, jak se vykreslí znak stupně, protože nechat vykreslit proměnnou typu `char` ani řetězec typu `string`, ve kterých bylo uloženo „°“ k výsledku nevedlo. K nalezení pomohl kód, kde se postupně vykreslovaly všechny znaky od 0 do 255, díky tomu jsem nakonec našel, že jde o znak číslo 247 v decimální soustavě. Knihovna umí vykreslovat tvary i znaky v jakékoliv 16bitové barvě, a pro ty nejčastější barvy je na začátku programu definován jejich RGB kód, aby se pak tyto barvy daly v programu použít v člověku přijatelnější slovní formě.

Jako vstup od uživatele se využívá dotyková vrstva displeje. Jde o odporovou dotykovou obrazovku, k vyhodnocení polohy dotyku se využívají analogové vstupy vývojového kitu Arduino Mega. Třetí hodnota, která se dá získat z dotykové vrstvy displeje je síla dotyku, ale tato funkce je v programu použita pouze na detekci, zda se něco v danou chvíli dotýká displeje nebo ne. K tomuto zjišťování se používá funkce `.isTouching()`, která vrací `true`, když se něco dotýká a `false`, když se nic displeje nedotýká. Jelikož by se v případě použití podmínky `.isTouching()` opakovaly příkazy při splněné podmínce stále dokola, musel být do programu přidána funkce, která zajistí, že instrukce provedené při dotyku na displej budou reagovat jen na „náběžnou hranu“ dotyku na displej. Toto bylo provedeno přidáním proměnné typu `boolean wasNotTouching`, která se nastaví na `true`, když se nic displeje nedotýká, na `false`, když je registrován dotyk na displeji a přidáním do podmínky `.isTouching() && wasNotTouching`. Dotyková vrstva na tomto přípravku slouží k manuálnímu nastavení režimu ohřevu/chlazení bateriových článků. Po klepnutí na tlačítko zobrazující aktuální stav se ve spodní části obrazovky zobrazí tři tlačítka, „HEATING“, „COOLING“ a „OFF“ a po klepnutí na kterékoli z nich se stav aktualizuje. Dále je nutné před vykreslením těchto tří tlačítek vymazat obsah, který byl na dotčené ploše předtím a po klepnutí na jedno ze tří tlačítek nebo kamkoliv jinam, ho zase vypsát znovu.

8.2. Řešení obnovy informací v pravidelných intervalech

K tomu, aby se nějaká část programu vykonala jen po uplynutí nějaké doby jsou v programu uloženy proměnné datového typu `unsigned long` obsahující číslo, které představuje počet milisekund od spuštění programu. Dále se program skládá z podmínek, které porovnávají rozdíl aktuální doby běhu programu v milisekundách s poslední obnovou a pokud je rozdíl větší než nějaká konstanta, část programu v podmínce se provede a proměnná obsahující počet milisekund od spuštění

programu se přepíše. Pro každou podmínku se musí definovat samostatná proměnná, díky tomu lze mít v programu relativně velké množství částí programu, které se vykonávají v rozdílných intervalech.

Ke stejnému výsledku by se dalo dojít i s využitím časovačů a přerušení. Ale vzhledem k tomu, že na mikrokontroléru ATmega 2560 je pouze 6 časovačů, a přerušení ze své podstaty, že přeruší běh programu, vykoná se program pro obsluhu přerušení a pak se vrátí zase na čtení instrukcí z adresy původní, se hodí spíše na více kritické aplikace, než je vypsání nových dat na displej.

Konkrétně se v Arduino IDE ke zjištění doby běhu programu používá funkce `millis()`. Vzhledem k velikosti datového typu `unsigned long` 32 bitů dojde k přetečení číselného výstupu z funkce `millis()` po přibližně 50 dnech, což je dostatečně dlouhá doba. Těžko si představit, že by program měl bez restartu běžet takhle dlouho, ale pokud by se tak mělo stát, musí se tato skutečnost ošetřit, aby nedošlo k nějakému kritickému stavu. Pro představu, údaje o napětí článků, o měřeném proudu a řízení balancování jsou aktualizovány každých 500 ms, údaje z teplotních čidel jsou aktualizovány každých 5 sekund. PWM k ovládní Peltierových článků má rozlišení 50 ms a perioda sčítání miliampérhodin akumulátoru je 20 ms.

8.3. Sčítání miliampérhodin akumulátoru

Jak bylo zmíněno v předchozím odstavci, program má funkci měření miliampérhodin. Během rozmyšlení o realizaci této funkce bylo naraženo na problém uchovávání dlouhých čísel ve výpočetní technice. Datový typ `float` velikosti 32 bitů, který má 1 bit znaménko, 8 bitů exponent a 23 bitů mantisu už například není schopen uchovat číslo 3000,0001, místo toho uchová pouze 3000 a 0,0001 úplně vypustí. Což se pro tuto aplikaci nehodí. Jako řešení je použito dvou různých proměnných, hlavní proměnné typu `short miliAmperHours`, která nabývá 0 až 3000 a pomocné proměnné typu `float microAmperHours`. Jak se dojde k výpočtu mikroampérhodin je popsáno v následujících rovnicích:

$$\text{Ah} = 3600 \text{ A} \cdot \text{s} \quad (9)$$

$$\text{mAh} = 3,6 \text{ A} \cdot \text{s} \quad (10)$$

$$\mu\text{Ah} = 3,6 \text{ A} \cdot \text{ms} \quad (11)$$

Vzhledem k tomu, že Arduino měří proud v ampérech a čas v milisekundách, je tohle tvar, který je nejvhodnější k výpočtu. Proměnná `float microAmperHours` se tedy vypočte: `microAmperHours = Δt * current / 3.6;`, kde `Δt` je, jak bylo zmíněno v předchozím odstavci, okolo 20 ms. Záleží na tom, jak dlouho se vykonávají předchozí instrukce programu, ale čas `Δt` je každopádně vždy změřen přesně. Dále v programu je podmínka, která zjišťuje, zdali je proměnná `microAmperHours` větší/menší než 1000 a poté se proměnná `miliAmperHours` inkrementuje/dekrementuje, a nakonec se od `microAmperHours` odečte/přičte 1000.

Sčítání zbývajících miliampérhodin se později ukázalo jako velmi výhodné při určování stavu nabití (SoC) a tvorbě nabíjecí křivky. V původní verzi softwaru se SoC určoval pouze na základě napětí článků, které je ale vlivem vnitřního odporu závislé na proudu z/do článků. Například při zapojení akumulátoru na zdroj proudu 4 A vzrostlo napětí z 3,5 V na 3,7 V a podle toho i vypočítaný stav nabití. Tato chyba byla opravena a nově se SoC vypočítává podle zbývajících kapacity článků a na tento neduh už netrpí. Rovněž bylo na začátku uvažováno o uchovávání informace o zbývajících Wh uložených v akumulátoru. Jelikož je to jednotka energie, má o něco větší vypovídací hodnotu než pouze jednotka kapacity mAh. To by ale přineslo tu nevýhodu, že Wh uložené do akumulátoru a Wh následně z něj spotřebované nejsou v poměru 1:1, na rozdíl od mAh. Tento rozdíl je způsoben ztrátou energie na vnitřním odporu článků, kde se část energie ztratí ve formě tepla.

8.4. Práce s teplotními čidly DS18B20

K použití senzorů teploty DS18B20 bylo potřeba zahrnout knihovnu zajišťující komunikaci přes 1-Wire sběrnici `onewire.h` a knihovnu pro práci některými teplotními čidly původně od výrobce Dallas Semiconductors `DallasTemperature.h`. Knihovna `onewire` umí zjistit, kolik je zařízení připojených na sběrnici, takže se dá v kódu ohlídat, pokud by některé čidlo z nějakého důvodu přestalo fungovat. Pro

přístup k teplotám jednotlivých čidel je potřeba znát jejich index. Indexy jsou seřazené od 0 do N – 1 podle jedinečné adresy čidel seřazené vzestupně. Proto jsem si před použitím nechal programem vypsat adresy čidel, seřadil od nejmenšího po největší a poté je umístil na přípravek tak, že čidlo s nejmenší adresou a tedy indexem 0 měří teplotu prvního článku, a to s nejvyšší adresou a tedy indexem 3 měří teplotu čtvrtého článku.

8.5. Korekce naměřených hodnot

Bohužel naměřená napětí z AD převodníku Arduina a teplot ze senzorů se lišily od skutečnosti. Například napětí článku změřené multimetrem UT219E bylo 4,17 V a s pomocí Arduina Mega bylo naměřeno napětí 4,29 V. Další příklad, kdy se hodnoty rozcházelily byly naměřené teploty, i když celý přípravek stál několik dní v jedné místnosti, nesvítilo na něj žádné silné sluneční záření ani nefoukal teplý vzduch, či působil jiný vliv, který by rozdíl teplot jednotlivých článků mohl ovlivnit, stejně se rozcházelily teplota článků i o 4 °C při teplotách okolo 21 °C. Proto bylo potřeba naměřené hodnoty korigovat. K tomuto účelu byl použit následující vztah převzatý z [17]:

$$T_{\text{corrected}} = \frac{(T_{\text{measured}} - T_{\text{measured,min}}) \cdot (T_{\text{reference,max}} - T_{\text{reference,min}})}{T_{\text{measured,max}} - T_{\text{measured,min}}} + T_{\text{reference,min}} \quad (12)$$

Tento vztah se ukázal jako dobře fungující. Obsahuje dva typy teplot, výstup z teplotního čidla, označovaný jako T_{measured} a referenční teplotu, kterou přesně známe $T_{\text{reference}}$. Jedna z nejlepších metod kalibrace teplotních senzorů je vystavit je vroucí vodě a vodě na bodu mrazu, teploty, při kterých dochází k těmto dějům, jsou velmi dobře známy. Pouze je potřeba započítat i vliv nadmořské výšky, a tedy klesajícího atmosférického tlaku na teplotu varu vody. Ale toto bylo v mém případě už těžko realizovatelné, protože když jsem se začal kalibrací zabývat, měl jsem už bohužel teplotní čidla přilepená na článkách baterie. Kalibrace měření napětí byla provedena s články v nabitěm stavu při 4,16 V a při vybitěm stavu při 3,14 V. Jako reference byl použit multimetr Uni-T UT219E. Nejde sice o žádný etalon, ale vzhledem k pandemické situaci, kdy je přístup na fakultu velmi ztížený, jde o nejlepší dostupné řešení. Jako reference pro měření teploty byl použit dedikovaný digitální teploměr s rozlišením 0,1 °C, jehož přesnost měření byla ověřena s využitím lihového teploměru při teplotě 11 °C a 60 °C. Digitální teploměr při těchto teplotách zobrazoval 10,6 °C respektive 60,8 °C, takže se dá říct, že měří pro tyto účely velmi přesně.

Referenční „vysoká“ teplota byla dosažena vystavením přípravku a teploměru během teplého jarního odpoledne za tlustou záclonu, takže v místnosti byla v tu chvíli vysoká ambientní teplota, ale bez přímého slunečního záření, které by více ohřívalo tmavé povrchy než světlé. Tato teplota činila 24,2 °C. Nízké referenční teploty bylo dosaženo večer, kdy byl přípravek umístěn na několik hodin mezi okna, s tím, že vnější bylo necháno pootevřené, tak bylo dosaženo teploty reference 10,3 °C, poté byly do tabulky poznamenány i zbylé měřené teploty jednotlivých čidel a referenční měření bylo dokončeno.

8.6. Výpočet zbývající doby provozu do vybití akumulátoru

Odhad zbývající doby provozu neboli v elektromobilním světě odhad zbývajícího dojezdu, byl postaven na základě známé zbývající kapacity v mAh a zprůměrování posledních hodnot proudu. O dojezdu se v případě mého modelu nedá mluvit, protože nikam nejezdí, a tudíž se nedá měřit spotřeba na vzdálenost, ale zbývající doba provozu je dobrý kompromis. Odhad se aktualizuje každých 10 sekund a počítá s průměrem šesti hodnot proudu za poslední minutu s krokem 10 sekund. Výpočet je postaven na následující rozměrové analýze:

$$\frac{\text{mAh}}{\text{mA}} = h = 3600 \cdot s \quad (13)$$

$$\frac{\text{mAh}}{\text{A}} = 3,6 \cdot s \quad (14)$$

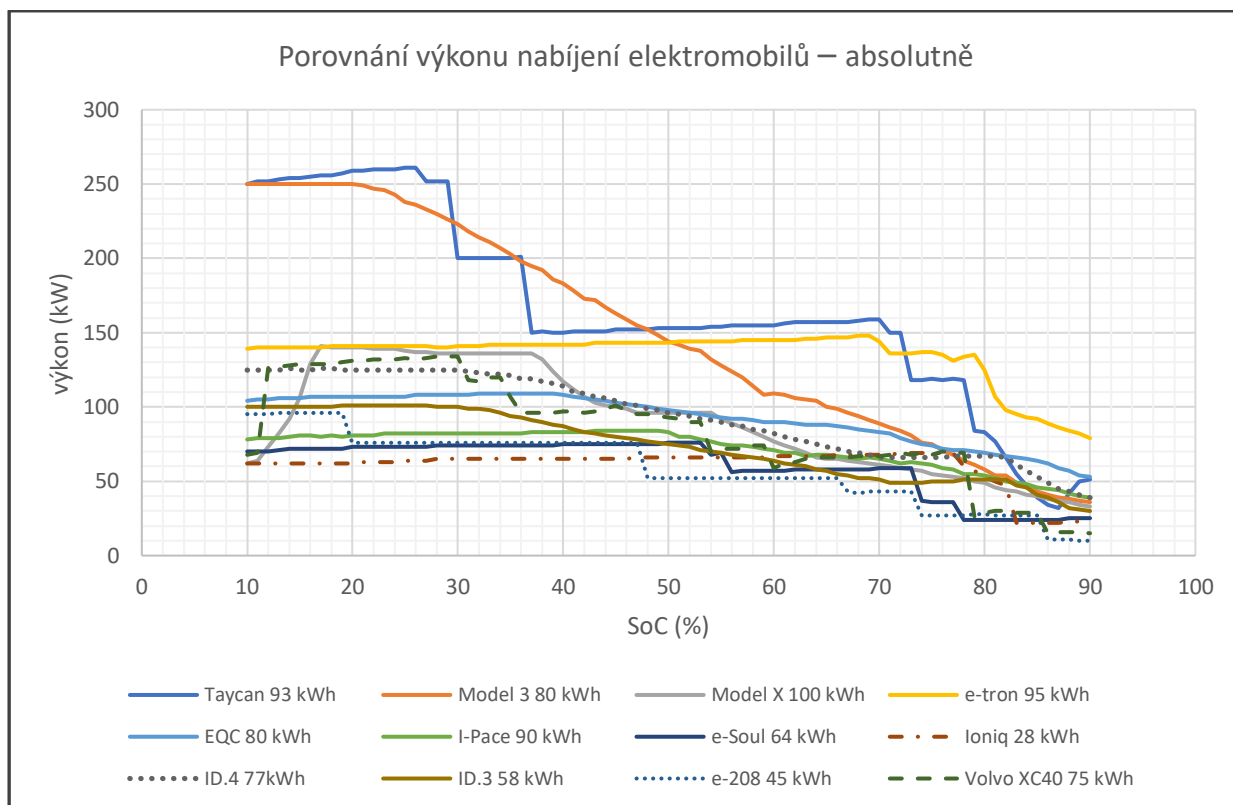
Proměnná obsahující zbývající dobu do vybití v sekundách se tedy vypočte: `float timeRemaining = (miliAmperHours / averageCurrent) * 3.6;`
 Ta se dále rozdělí na hodiny minuty a sekundy, které se nakonec vypíší uživateli na displej.

8.7. Výpočet nabíjecího a vybíjecího proudu na základě SoC a teploty článků

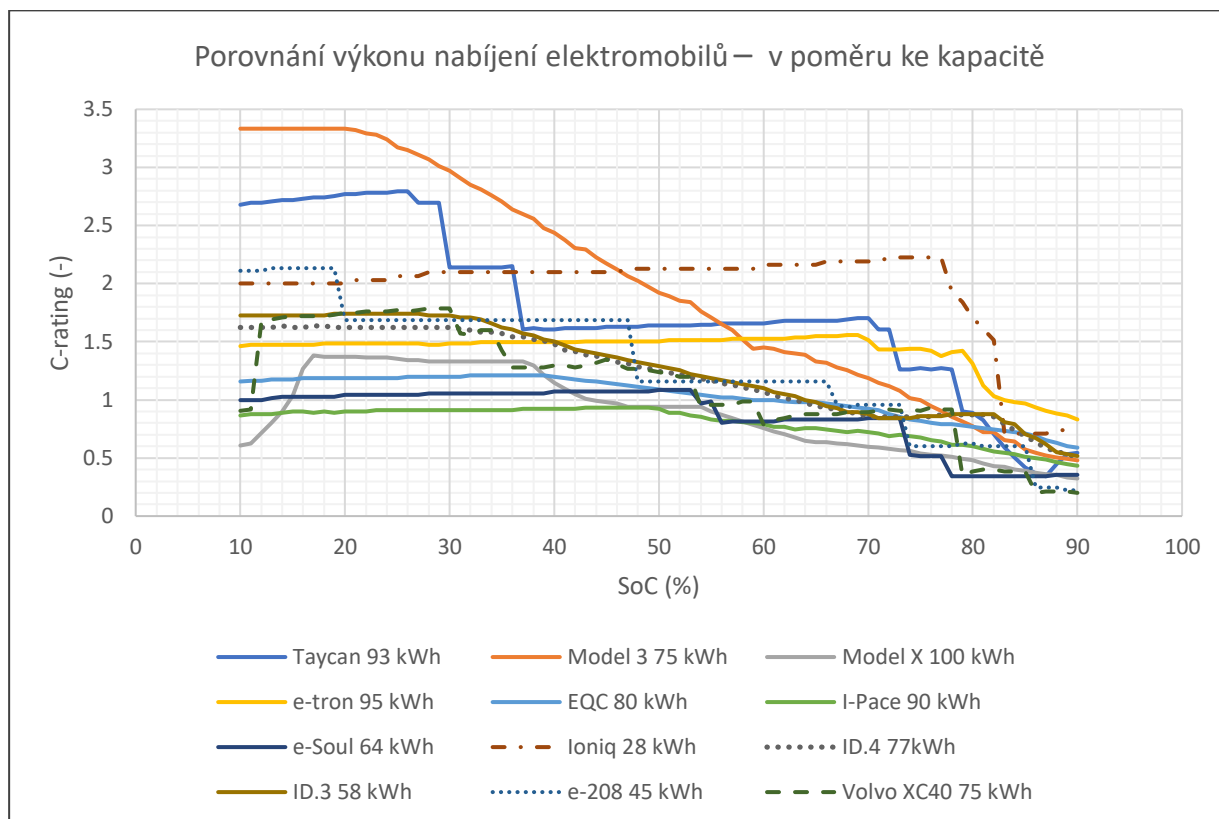
Toto je další velmi důležitá část této práce. Pokud jde o informace od výrobců Li-ion článků, jak vypočítat nabíjecí a vybíjecí proud na základě SoC a teploty, pak tyto informace nejsou žádné. Výrobci v datasheetech uvádí pouze maximální nabíjecí a vybíjecí proudy, ale tyto hodnoty jsou značně konzervativní, dosažitelné po celý povolený teplotní rozsah. S tím by si výrobci elektromobilů zcela jistě nevystačili. Proto jsem se inspiroval právě tím, jak tento úkol řeší výrobci současných elektromobilů.

Co se týče závislosti maximálního nabíjecího výkonu v závislosti na teplotě, nejvíce informací je dostupných od majitelů vozů Nissan Leaf, který je celkem často postižen snižováním nabíjecího výkonu při přehřátí akumulátoru. Na fórech se dají najít tabulky závislosti teploty na maximálním výkonu. To je dobrý bod, kde začít.

K závislosti nabíjecího výkonu na stavu nabití (SoC) je mnoho přístupů. Na grafu jsou některé vidět. Zatímco některé elektromobily nabíjí stejným proudem po téměř celou dobu nabíjení a výkon se pomalu zvyšuje s tím, jak roste napětí akumulátoru, typickým příkladem jsou Audi e-tron (až 144 kW při 70 %) a Hyundai Ioniq (až 60 kW při 68 %), tak jiné elektromobily, jako například Porsche Taycan, nebo Kia e-Soul mají na grafu velmi patrné „schody“, v určitých několika málo stavech nabití byly naprogramovány výrazně snížit nabíjecí proud. U ostatních automobilů se dá pozorovat více lineární pokles nabíjecího výkonu. Tesla Model 3 se nabíjí výkonem 250 kW mezi 10 % a 20 %, pak už výkon lineárně klesá, při 50 % už je výkon necelých 150 kW. U Jaguar I-Pace nabíjecí výkon roste až do 50 % stavu nabití, kdy dosáhne 84 kW a poté relativně lineárně klesá. Podobně tomu je i u Mercedesu-Benz EQC, maximální výkon činí 108 kW při 40 % a pak už nabíjecí výkon klesá. Graf končí při SoC 90 %, podle nabíjecího výkonu například při 90 % se dá určit, zda má dané vozidlo „buffer“, v češtině by se to dalo označit jako skrytou kapacitu. Pokud výrobce využitelnou kapacitu baterie elektronicky omezil a články nenabíjí na 4,2 V, ale pouze na 4,1 V a toto napětí prohlásí za 100 % stav nabití, může se i při vyšších SoC nabíjet relativně vyšším proudem, a tedy vyššími výkony, než když výrobce využívá celou kapacitu akumulátorů a články nabíjí na 4,2 V. Z toho tedy plyne, že Porsche Taycan, Audi e-tron a Mercedes-Benz EQC mají buffer, a naopak vozy od výrobce Tesla, Kia e-Soul, Jaguar I-Pace ani Hyundai Ioniq 1. generace skrytou kapacitu akumulátoru nemají.



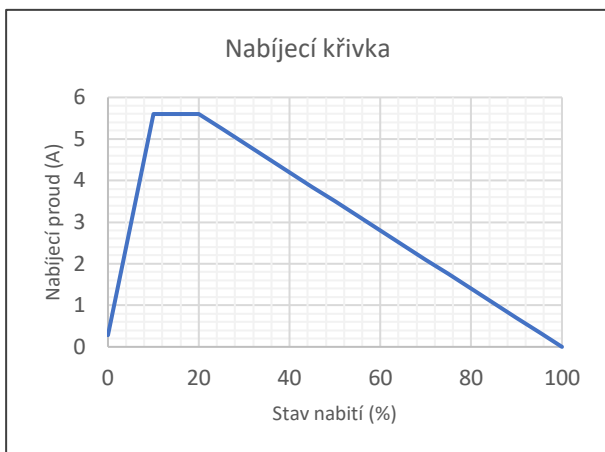
Obr. 20: Nabíjecí křivky vybraných elektromobilů (vytvořeno podle dat z [18])



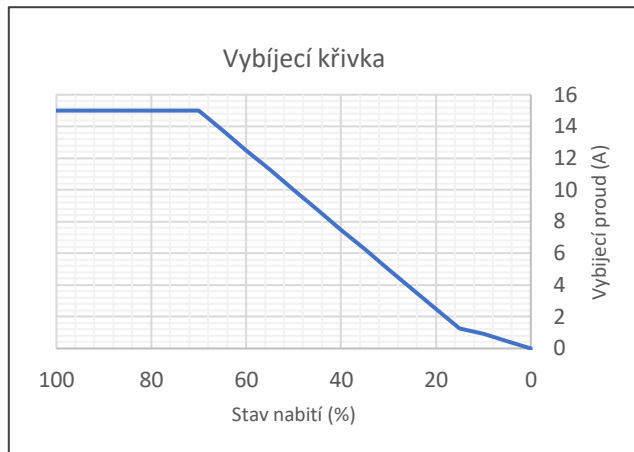
Obr. 21: Nabíjecí křivky v poměru ke kapacitě vybraných elektromobilů (vytvořeno podle dat z [18])

Přípravek tedy funguje tak, že určuje maximální proud z/do akumulátoru a přes komunikační rozhraní ho sděluje ostatním komponentům elektromobilu, které podle toho omezují svůj odběr proudu. V programu, který řídí chování přípravku je použita nabíjecí křivka inspirovaná Teslou Model 3, maximálního výkonu se dosahuje mezi 10 % a 20 %, poté se nabíjecí výkon postupně snižuje. Změna oproti Tesle Model 3 je, že *C-rating* na mém přípravku je vynásoben faktorem přibližně 0,5. V programu je tedy tato nabíjecí křivka popsána, tak že mezi 0 % a 10 % SoC nabíjecí proud lineárně roste od 0,1C do 2C. Na hodnotě 2C přetrvává do 20 % SoC a poté lineárně klesá, v 95 % je 0,125C a v 100 % je proud 0 A.

Vybíjecí křivka je koncipována tak, že pro stav nabití větší nebo roven 70 % je maximální vybíjecí proud 15 A, což je polovina maximálního vybíjecího proudu uvedeného v datasheetu. Poté už je maximální vybíjecí proud snižován. Při nižším stavu nabití se nepříznivě zvyšuje vnitřní odpor článků, a proto je potřeba se k minimální hodnotě napětí článků „přibližovat“ pomaleji. Od 70 % do 15 % SoC je vybíjecí křivka proložena přímkou se strmější směrnicí a od 15 % k 0 % přímkou s pozvolnější směrnicí. Tato pozvolnější směrnice je z důvodu toho, že s nižším stavem nabití bohužel ještě více roste vnitřní odpor článků a poslední zbytek energie je tedy nutné vyčerpat pomalu, aby během odběru proudu nekleslo napětí pod mez určenou výrobcem a neurychlovaly se degradační procesy v článcích.



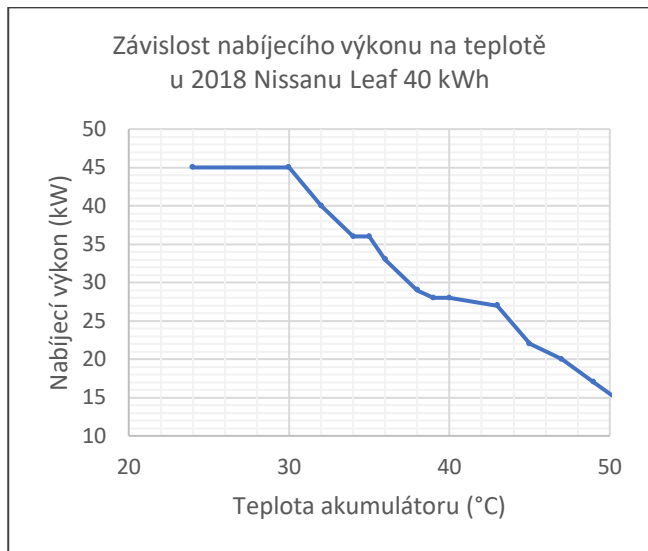
Obr. 22: Závislost nabíjecího proudu na stavu nabití



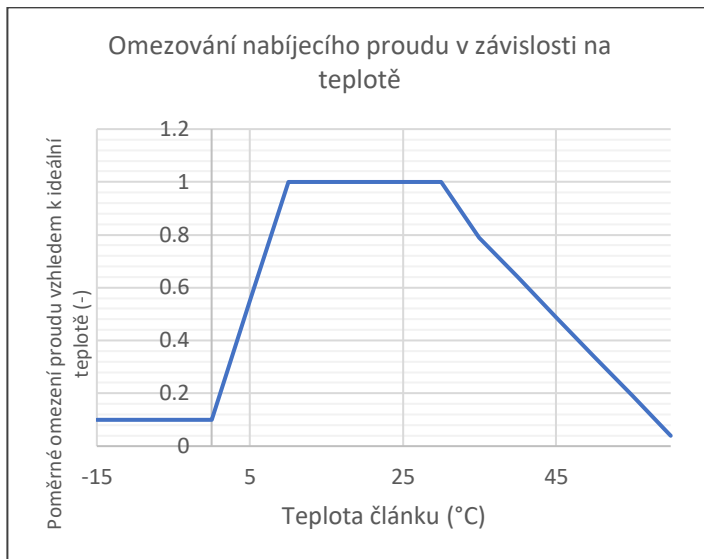
Obr. 23: Závislost vybíjecího proudu na stavu nabití

Pro vytvoření vzorce pro výpočet omezení nabíjecího proudu v závislosti na teplotě jsem vycházel z dat [19] majitelů vozů Nissan Leaf. Tato tabulka obsahovala výkony nabíjení pro teplotu baterie mezi 24 °C a 51 °C. Mezi 24 °C a 30 °C nedochází k žádnému omezení výkonu, ale poté je výkon s rostoucí teplotou přibližně lineárně omezován, až při 51 °C je výkon 14 kW, což je 0,31 krát původní hodnota. Tyto získané údaje jsem vykreslil do grafu na Obr. 24. V datasheetech všech Li-ion článků se udává minimální teplota nabíjení 0 °C, ale v reálné aplikaci v elektromobilech jsou akumulátory nabíjeny i při teplotách pod nulou, ale proud je omezen například na 0,1C. Z toho plyne navrhovaná charakteristika omezení nabíjecího proudu. S charakteristikou nabíjecího proudu se pracuje tak, že dosahuje hodnot 0 až 1 podle teploty a je s ní dále vynásobena hodnota nabíjecího proudu podle stavu nabití. Pro teploty pod 0 °C je 0,1, poté mezi 0 °C a 10 °C lineárně roste až k 1, tam se drží až do 30 °C a poté lineárně klesá přibližně stejně jako vzor Nissan Leaf, takže při 51 °C je charakteristika na hodnotě 0,31. Tento průběh je zobrazen na grafu na Obr. 25.

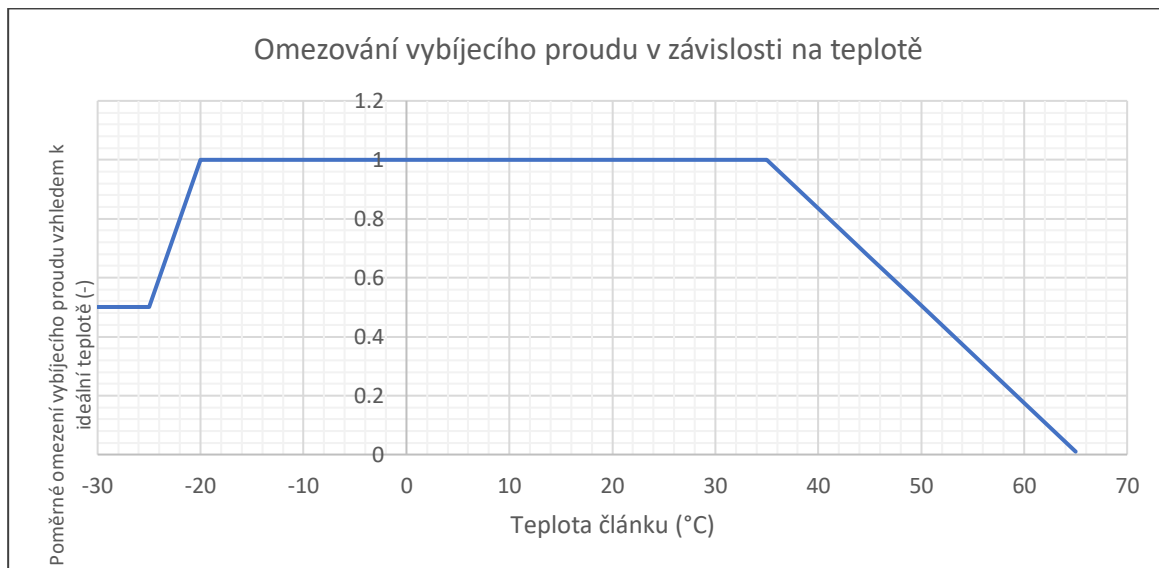
Co se týče omezení vybíjecího proudu kvůli příliš vysoké nebo nízké teplotě, v praxi k němu moc často nedochází, mimo jiné i proto, že rozsah teplot, při kterém se dají Li-ion akumulátory vybit bez omezení je širší, než rozsah teplot, při kterém se dají nabíjet bez omezení. Vybíjení akumulátoru je většinou záležitost na 1,5 hodiny až 7 hodin v závislosti na množství uložené energie a rychlosti jízdy. Zpravidla je jízda elektromobilu čas, kdy může akumulátor vychladnout, ale i tak je důležité se omezením vybíjecího proudu v závislosti na teplotě zabývat. V datasheetech Li-ion článků se uvádí minimální teplota vybíjení – 20 °C, ale znovu, elektromobily výrazněji neomezují vybíjecí proud ani při nižších teplotách. Při vyšších teplotách, například nad 40 °C, kdy akumulátor byl například ohřát rychlým nabíjením, opravdu dochází k omezení vybíjecího proudu, aby nebyl problém s přehříváním dále prohlubován. V programu je omezení vybíjecího proudu realizováno tak, že v rozsahu teplot -20 °C až 35 °C není odebíraný proud nikterak limitován. Dále pro teploty 35 °C a více je proud omezován podle přímky, s tím, že při přibližně 65 °C je odebrání proudu zastaveno úplně. Pro nízké teploty méně jak -20 °C je limitující konstanta s ohledem na datasheet použitých článků nastavena na 0,5. Tato charakteristika je zobrazena na grafu na obrázku Obr. 26.



Obr. 24: Omezení nabíjecího výkonu v závislosti na teplotě (vytvořeno podle dat z [19])



Obr. 25: Navržená charakteristika omezení nabíjecího proudu v závislosti na teplotě



Obr. 26: Navržená charakteristika omezení vybíjecího proudu v závislosti na teplotě

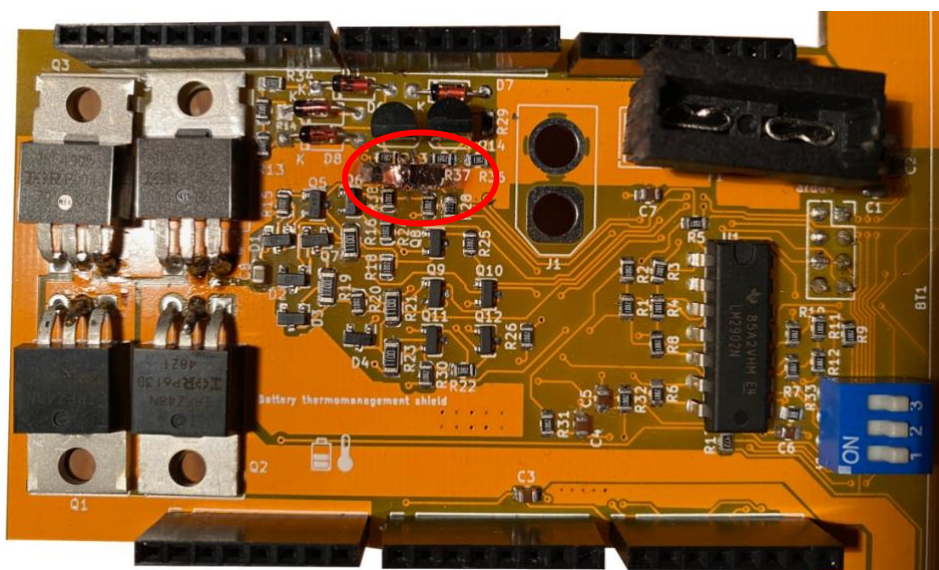
9. Testování

Když už byl přípravek hotový, přišla řada na testování. Samozřejmě i během stavby přípravku docházelo pravidelně k testování součástí, které byly zrovna přidány jako poslední, jmenovat lze například diferenční zesilovače a teplotní čidla. V této kapitole se ale budu věnovat hlavně testování modelu ve třech základních nejvíce vypovídajících režimech – normální stav, přehřátí a podchlazení akumulátoru.

9.1. Incident

K incidentu došlo 30. prosince 2020 okolo 17. hodiny během jednoho z prvních testování přípravku spojeného s vývojovým kitem Arduino Mega. V tu dobu byl nahraný program ještě relativně strohý a byl schopen pouze měření napětí na článcích, vypsání hodnoty na displej a vykreslení bargrafu podle naměřeného napětí. Už po přibližně 30 sekundách byl napěťový stabilizátor na vývojovém kitu tehdy ještě bez chladiče velmi horký na dotek, a proto jsem se rozhodl rychle Arduino Mega z přípravku sejmut. Tím, jak je Arduino Mega s přípravkem spojeno konektory s celkem 58 piny, je k oddělení potřeba celkem velké úsilí a uživatel zjistí, že nejsnazší je tahat postupně za jednu stranu a poté za druhou, a tak po malých krocích docílit oddělení. Ke konci tohoto postupu může docházet k tomu, že

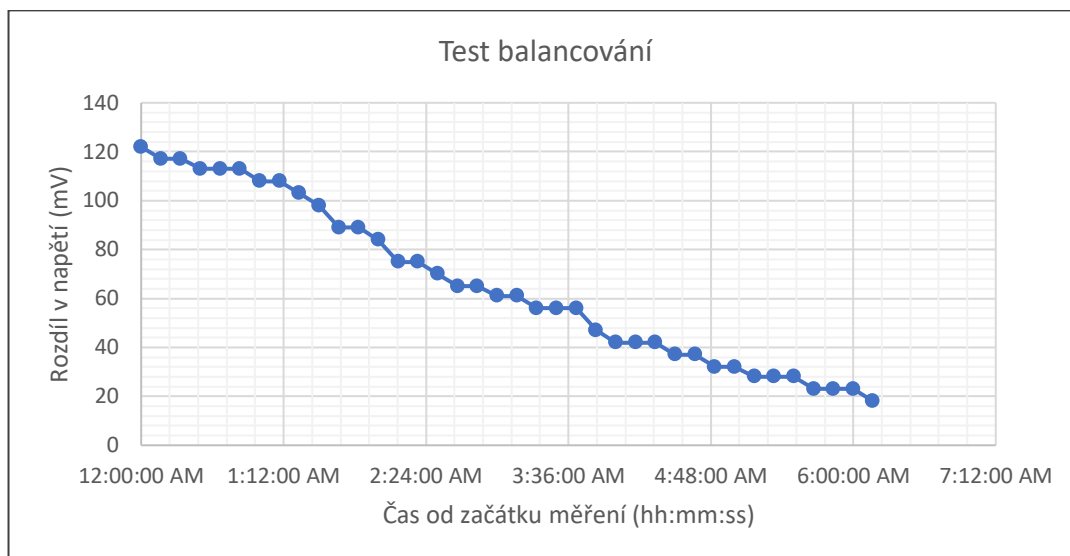
se některé piny střídavě spojují a odpojují nebo, že je na nich podstatný přechodový odpor. To pravděpodobně způsobilo, že pinem číslo 39, na který je přes rezistor R29 připojena báze NPN tranzistoru Q14, protékal po určitou dobu takový proud, který po vynásobení proudovým zesílením β NPN tranzistoru Q14 vyvolal proud kolektorem takový, že odporový dělič tvořený rezistorem R13 a odporem tranzistoru Q14 mezi kolektorem a emitorem měl poměr přibližně 1:1. Kvůli tomu bylo po určitou dobu napětí na pinech *gate* MOSFETů (Q2 a Q4), ze kterých je tvořen H-můstek přibližně $V_{cc}/2$ a tedy oba MOSFETY byly sepnuté zároveň. To nevyhnutelně způsobilo příliš velký proud tekoucí přes tuto proudovou cestu. To nejvíce viditelně poškodilo cestu na desce plošných spojů, kterou tento incident v jednom místě kompletně „přepálil“. Další poškozené komponenty byly oba MOSFETY, kde se z jednoho stal mezi pinem *drain* a *source* zkrat a z druhého rozpojený obvod bez ohledu na přiložené napětí *gate* – *source*, přestaly tedy plnit svou původní funkci. Jako náprava byla přerušená cesta na desce plošných spojů po odstranění přepálené části a očištění místa izopropylalkoholem přemostěna vodičem a poškozené tranzistory byly zakoupeny nové a vyměněny. Je zajímavé, že pojistka na 30 A (maximální hodnota proudu na který jsou dimenzovány použité Li-ion články) tento proud vydržela bez poškození. Poučení z tohoto bylo, že je potřeba vždy před sejmutím Arduina Mega nejprve vyjmout pojistku z držáku, a to zabrání, aby se toto poškození vysokým proudem při sepnutí obou spínačů H-můstku najednou opakovalo.



Obr. 27: Přepálená cesta na DPS po incidentu

9.2. Testování funkce balancování

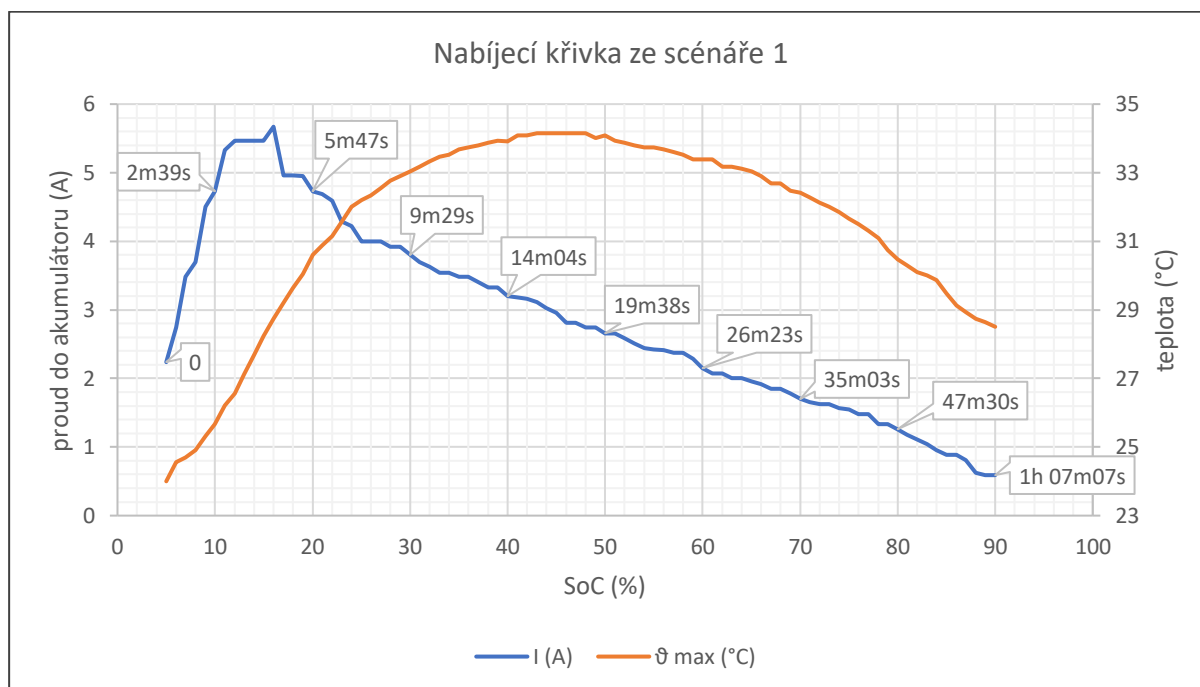
K otestování, jak funguje balancování, byl jeden z článků záměrně nabit na větší napětí než ostatní. Dalo se očekávat, že půjde o měření dlouhé několik hodin, a proto byla poznamenávána hodnota rozdílu, která je vypisována na LCD displeji, jednou za 10 minut. Měření začalo s rozdílem napětí článku s největším napětím a článku s nejmenším napětím 122 mV a skončilo po 6 hodinách a 10 minutách s rozdílem 18 mV. Průběh je zobrazen na grafu na Obr. 28. V grafu jsou patrné „schody“, které tam vznikly z důvodu, že se rozdíl napětí nezmenšil o více než je rozlišovací schopnost AD převodníku mikrokontroléru, která je přibližně 4,88 mV a tak až 3 hodnoty v řadě byly stejné.



Obr. 28: Měření funkce balancování

9.3. Testovací scénář 1: akumulátor má na počátku teplotu 20 °C

První scénář byl koncipován tak, že je akumulátor vystaven teplotě, o které se dá říct, že je pro něj ideální. Testování probíhalo tak, že se přípravek připojil na zdroj stejnosměrného proudu/napětí a stejně jako v reálném světě, kde elektromobil komunikuje s nabíjecí stanicí a sděluje jí okamžitý maximální proud, tak i tady přípravek určoval maximální okamžitý proud a vypisoval ho na displej. Podle toho se pak musel ručně upravit proud dodávaný zdrojem. Do budoucna by se toto dalo vylepšit a zajistit nějakým způsobem komunikaci mikrokontroléru a digitálně řízeného DC zdroje. Do tabulky pak byly zaznamenávány údaje (proud a teplota) čtené přípravkem právě v momentě, kdy se změnil stav nabití (kdy „přibylo další procento“). Zaznamenávaná byla teplota nejteplejšího ze čtyř článků. Nutno poznamenat, že i přes snahu měřit teplotu článků co nejméně a opatření takové, že jsou teplotní čidla spojená s články teplovodivou pastou, je měřená teplota menší, než jaká je ve skutečnosti uvnitř článků. Dalším údajem byla doba od začátku nabíjení, kterou jsem si poznamenával při každých celých 10 % stavu nabití. Z tohoto měření jsem zhotovil graf na Obr. 29.



Obr. 29: Nabíjecí křivka bez aktivního Peltierova článku

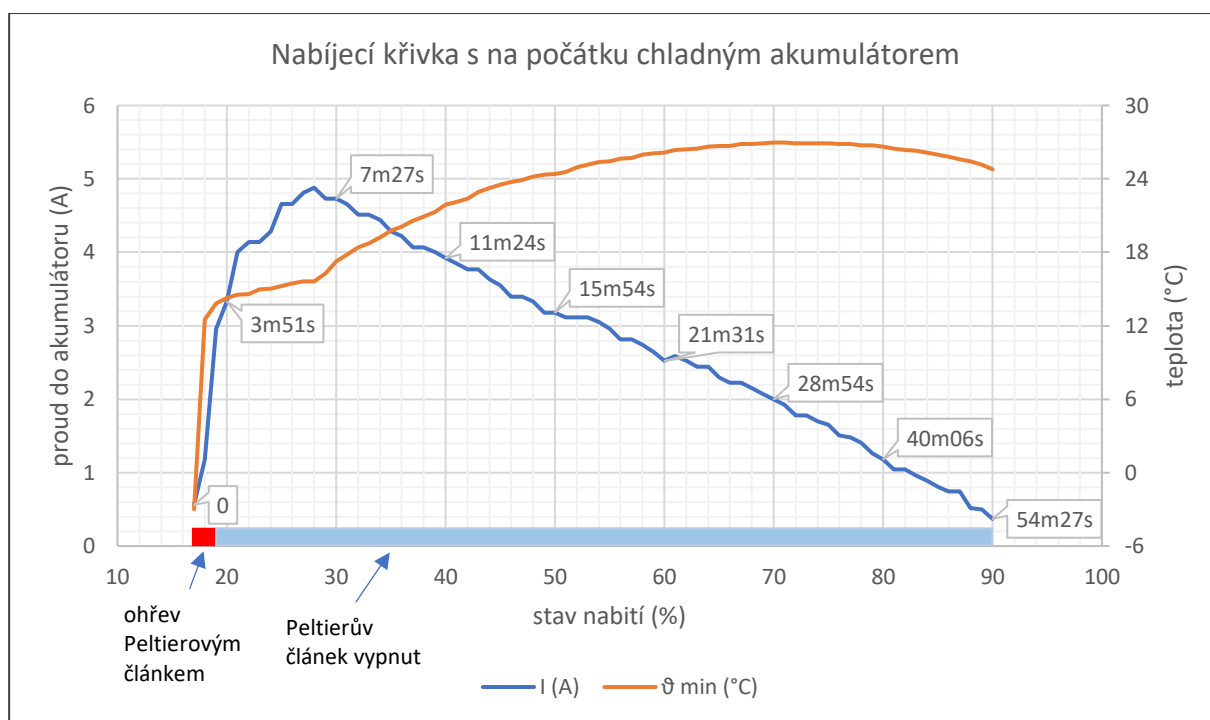
Přípravek tedy určoval maximální nabíjecí proud přesně podle toho, jak bylo popsáno v kapitole 8.7. Nabíjení započalo při stavu nabití 5 % proudem 2,24 A. Postupně se proud zvyšoval až dosáhl

maxima 5,67 A při 16 %. Za dobu 5 minut a 47 sekund (jak lze vidět na grafu v přidaných bublinách) se akumulátor nabil na 20 % a teplota stoupla z původních 24 °C na 30,6 °C. S tím, jak se pro SoC více jak 20 % začal proud snižovat, se začala snižovat i směrnice zvyšování teploty akumulátoru. Nejvyšší teplota byla dosažena při 43 %, a to 34,15 °C. Tato teplota už spadá do oblasti, kde dochází k omezení nabíjecího proudu z důvodu příliš vysoké teploty. S rostoucím SoC se dále snižoval proud a klesala teplota. 50 % SoC bylo dosaženo za 19 minut a 38 sekund a 80 % SoC za 47 minut a 30 sekund. Dále je vidět, že čekat na nabití dalších procent se už časově nevyplatí – dostat se na 90 % SoC trvalo dokonce 1 hodinu a 7 minut.

Bohužel v grafu to není zachyceno, ale zajímavé bylo pozorovat, jak se vyvíjelo napětí na článcích, konkrétně na tom s nejvyšším napětím, u něj bylo už pro SoC větší než 65 % napětí větší než 4,15 V, ale až do 90 %, kam probíhalo toto měření, nestouplo přes 4,2 V. To je z důvodu, že napětí na terminálech článku je v podstatě součet napětí naprázdno a napětí na vnitřním odporu, s tím, že při 65 % bylo napětí naprázdno relativně menší, ale proud článkem, a tedy i napětí na vnitřním odporu bylo relativně větší. Naopak při 90 % bylo napětí naprázdno už relativně větší, ale proud článkem, a tedy i napětí na vnitřním odporu bylo relativně menší, ale součet byl vždy okolo 4,15 V.

9.4. Testovací scénář 2: akumulátor je na počátku podchlazený

Tento scénář zahrnoval na začátku akumulátor s teplotou nižší než 0 °C. Proto byl přípravek umístěn na hodinu do mrazáku. Poté bylo připraveno měřicí pracoviště, aby nedocházelo ke zbytečným prodlevám mezi vyjmutím přípravku z mrazáku a započatím samotného měření. I tak, když byla teplota uvnitř mrazáku -8 °C, byla první odečtená hodnota (nejchladnějšího ze čtyř článků) po spojení s vývojovým kitem a displejem -6 °C a po spojení se zdrojem stejnosměrného proudu, a tedy započatím nabíjení -3 °C. Dále probíhalo měření stejně jako v minulém případě a výsledkem je následující graf na Obr. 30:



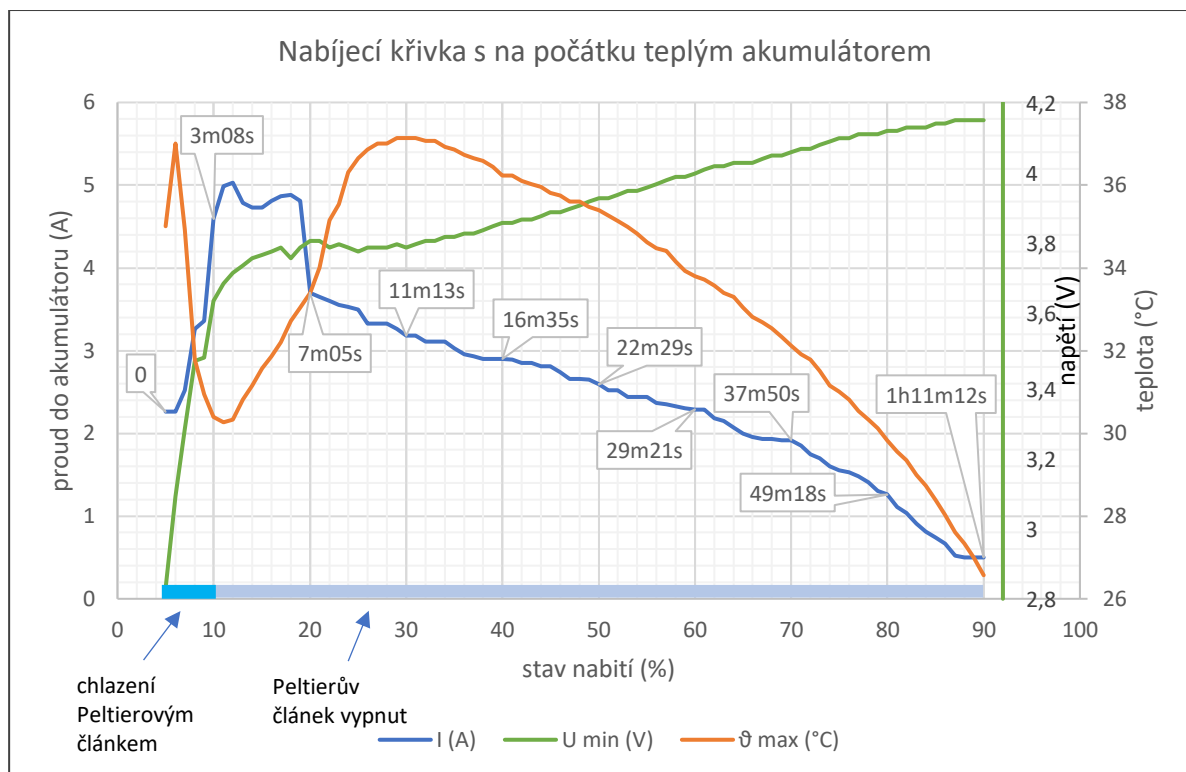
Obr. 30: Nabíjecí křivka kde byl Peltierův článek použit k ohřevu

Měření začalo při SoC 17 % a teplotě článků -3 °C. V moment, kdy do akumulátoru začal téct proud, se automaticky zapnuly Peltierovy články v režimu ohřevu. Nabíjecí proud byl zpočátku relativně nízký, limitovaný na hodnotu 0,1C, tedy 0,28 A. Peltierovy články o celkovém výkonu 16 W zahřály akumulátor velmi rychle a díky tomu při dosažení 18 % SoC byla teplota už 12,52 °C, více než je mez pro omezení nabíjecího proudu z důvodu nízké teploty. Nutno také poznamenat, že vnímání toho, jak rychle se články ohřály zkrusluje to, že na vodorovné ose grafu je SoC a ne čas. Ohřátí z minusových teplot na 10 °C trvalo přibližně 2 minuty, pak už se mohl ohřev vypnout a také se už mohl zvýšit nabíjecí proud a dosažení hranice 20 % SoC trvalo 3 minuty a 51 sekund. Z grafu je patrné, že nejdřív musela

stoupnout teplota a teprve poté se mohl zvýšit proud. Dále se nabíjecí proud postupně zvyšoval, až při 28 % SoC dosáhl maxima 4,88 A a dále vývoj pokračoval podle standardní nabíjecí křivky jako v předchozím testovacím scénáři. Teplota postupně rostla s tím, že s klesajícím nabíjecím proudem klesal i nárůst teploty. Nejvyšší teploty dosáhly články při 72 % SoC, a to 26,9 °C, dále s rostoucím stavem nabití a klesajícím proudem teplota klesala. 90 % SoC se dosáhlo po 54 minutách a 27 sekundách, což je rychleji než v minulém scénáři, a to z důvodu, že tentokrát měření začínalo na 17 % SoC namísto původních 5 %.

9.5. Testovací scénář 3, akumulátor má na počátku relativně vysokou teplotu

Třetí měření se vyznačovalo tím, že akumulátor byl z předchozího používání zahřátý na teplotu 35 °C. Vylepšení proti minulému měření je to, že jsem si nově poznamenával i napětí článku s nejnižším napětím. Zaznamenávána byla teplota nejteplejšího z čtyř článků. Výstupem tohoto měření byl graf na Obr. 31.



Obr. 31: Nabíjecí křivka kde byl Peltierův článek použit k chlazení

Měření začalo na 5 % SoC, teplota v tu chvíli byla 35 °C a napětí 2,83 V. V momentě, kdy do baterie začal téct proud, byly zapnuty Peltierovy články v režimu chlazení, to způsobilo relativně rychlý pokles teploty. Po 3 minutách a 8 sekundách při 10 % SoC už bylo napětí 3,64 V a teplota klesla na 30,4 °C, což už je přijatelná teplota a chlazení bylo vypnuto. Toto vypnutí chlazení společně s relativně velkým proudem způsobilo další růst teploty. Ale tentokrát jsem chtěl demonstrovat, jak přípravek začne omezovat maximální proud a jaký bude další vývoj teploty článků, a proto jsem nechal chlazení vypnuté i pro teploty nad 35 °C. Pro teploty nad 30 °C je tedy v grafu okolo 20 % stavu nabití vidět pokles nabíjecího proudu. Teplota článků na toto omezení reaguje s jakousi setrvačností a roste až do 30 % SoC, kdy dosahuje 37,14 °C, ale dále už s rostoucím SoC jen klesá. 50 % se dosáhne po 22 minutách a 29 sekundách a 90 % SoC se dosáhlo po 1 hodině a 11 minutách a akumulátor se za tu dobu stačil ochladit na 26,57 °C. Co se týče měřeného napětí článků během nabíjení, tak to velmi rychle vyrostlo s rostoucím proudem mezi 15 % a 25 % SoC bylo přibližně konstantní a mezi 25 % a 90 % SoC přibližně lineárně rostlo. Křivka vývoje napětí článků, která na začátku prudce vzroste ukazuje, jak je důležité určovat stav nabití akumulátoru primárně podle počítadla mAh, a ne pouze podle napětí, které je velmi závislé na proudu z/do článku. Samozřejmě se musí hlavně na konci nabíjení sledovat i napětí, protože počítadlo mAh může měřit s nějakou chybou. V programu musí být i podmínka sledující napětí nejvyššího článku a podle toho případně snižovat nabíjecí proud, aby nebyl článek přebíjen.

10. Závěr

Po porovnání různých typů chemického složení článků, které jsou nabízeny na trhu, byla pro svou nejvyšší hustotu energie v poměru k hmotnosti i objemu vybrána technologie Li-ion. Dále byl navržen a vyroben přípravek pro sledování parametrů těchto Li-ion článků během provozu s důrazem na teplotní poměry, čímž byl úspěšně splněn jeden z bodů zadání.

Přípravek, pokud je to potřeba, dokáže sám bez zásahu obsluhy rozhodnout o spuštění chlazení nebo ohřevu článků. K ohřevu nebo ochlazení použité Peltierovy články dosahují výkonu až 16 W a v porovnání s poměry v reálných elektromobilech jsou předimenzované. V reálném světě je poměr výkonu ohřevu k uložené energii v akumulátoru například 6 kW/100 kWh a na tomto přípravku je 16 W/44 Wh. To způsobí, že při měření ohřev z $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ na $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ zabral pouze 3 minuty. To ale v tomto případě, kde jde pouze o model a nehledí se na přidanou hmotnost jako v reálných elektromobilech, nevádí.

Součástí této práce je i poměrně rozsáhlá rešerše ohledně způsobů nabíjení současných elektromobilů ze střídavých i stejnosměrných nabíjecích stanic.

Pro zajištění dobré tepelné vodivosti mezi Peltierovými články a akumulátorem by bylo lepší vyrobit na míru kovové bloky, které by přilínali k článkům akumulátoru a Peltierovým článkům větší plochou. To se ale s ohledem na pandemickou situaci a horší dostupností dílen a laboratoří na fakultě nepodařilo realizovat, a proto bylo použito jednodušší a méně efektivní řešení s teplovodivou pastou.

Během měření nabíjecí křivky je nutné pravidelně sledovat na displeji přípravku, jaký je momentálně maximální nabíjecí proud, a ten ručně nastavit na zdroji stejnosměrného proudu a napětí. Do budoucna by se toto dalo vylepšit použitím digitálně řízeného zdroje stejnosměrného proudu a napětí a zprovozněním komunikace mezi přípravkem a zdrojem. Základ ve formě toho, že přípravek každých 500 ms přes UART posílá v danou chvíli maximální možný nabíjecí proud, už položen je.

Maximální nabíjecí proud použitých článků uvedený v datasheetu byl s ohledem na konstantní monitorování teploty, a tedy dodržení bezpečnostních parametrů, zvýšen z původních 4 A na 5,6 A. 5,6 A odpovídá *C-ratingu* 2C. Měření přineslo podnětná data o chování článků během tohoto rychlého nabíjení. Například zjištění, že se články během prvních 11 minut nabíjení ohřejí o přibližně $11\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Přípravek byl vybaven displejem, kde se všechny údaje relevantní k provozu akumulátoru zobrazují v textové i grafické podobě a pro vstup od uživatele se využívá dotykové vrstvy.

11. Reference

- [1] C. C. Chan, „The rise & fall of electric vehicles in 1828 - 1930: lessons learned,“ *Proceedings of the IEEE*, DOI:10.1109/JPROC.2012.2228370, č. 1, pp. 206-212, leden 2013.
- [2] T. Navrátil, „Causa Lithium - I,“ *DPS Elektronika od A do Z*, č. roč. 9, č. 3 květen/červen, s. 67, 2018.
- [3] H. M. Hogue, „Optimal CC-CV charging of lithium-ion battery for charge equalization controller,“ 2016. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Optimal-CC-CV-charging-of-lithium-ion-battery-for-Hoque-Hannan/380a4a7441498887a18f9cea503968381e20fe1a>. [Přístup získán 12. 5. 2021].
- [4] S. Ma, M. Jiang, P. Tao, C. Song, J. Wu, J. Wang, T. Deng a W. Shang, „Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review,“ *Progress in Natural Science: Materials International [online]*, sv. ISSN 10020071. DOI:10.1016/j.pnsc.2018.11.002, č. 28(6), pp. 653-666, 2018, [citováno. 20. 4. 2021].
- [5] „How to manage a battery,“ 8. 11. 2019. [Online]. Available: <https://ssj3gohan.tweakblogs.net/blog/18181/how-to-manage-a-battery>. [Přístup získán 3. 5. 2021].
- [6] „EV Charging Cable Type 2 to Type 2 32A 1 Phase 8m,“ [Online]. Available: <https://evchargeplus.com/shop/ev-charging-cable-type-2-to-type-2-32a-1-phase-8m/>. [Přístup získán 30. 4. 2021].
- [7] „EV charging cable Type 1 to Type 2 32A 1 Phase 5m,“ [Online]. Available: <https://evchargeplus.com/shop/ev-charging-cable-type-1-to-type-2-32a-1-phase/>. [Přístup získán 30. 4. 2021].
- [8] „SAE J1772,“ [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/SAE_J1772. [Přístup získán 30. 4. 2021].
- [9] „Level 1 and Level 2 Electric Vehicle Service Equipment,“ Texas Instruments, 2016. [Online]. Available: <https://tinyurl.com/evsecontrolpilot>. [Přístup získán 16. 4. 2021].
- [10] Z. Juda, „Pilot signal connection,“ 9. 2016. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Pilot-signal-connection_fig2_308694297. [Přístup získán 30. 4. 2021].
- [11] „Bringing EVs into the Smart Grid for Stability and Security,“ 3. 6. 2018. [Online]. Available: <https://www.digikey.com/en/articles/bringing-evs-into-the-smart-grid-for-stability-and-security>. [Přístup získán 30. 4. 2021].
- [12] „Design Guide for Combined Charging System,“ 2. 6. 2015. [Online]. Available: http://tesla.o.auroraobjects.eu/Design_Guide_Combined_Charging_System_V3_1_1.pdf. [Přístup získán 30. 4. 2021].
- [13] „Terra 54 Multistandardová stejnosměrná nabíjecí stanice,“ [Online]. Available: <https://tinyurl.com/ABBterra541>. [Přístup získán 30. 4. 2021].
- [14] „Tritium charging,“ 13 Listopad 2020. [Online]. Available: https://tritiumcharging.com/wp-content/uploads/2020/11/TRI105.DTA_.002_Veefil-PK350-Specifications.pdf. [Přístup získán 19. 4. 2021].
- [15] „The Basics of Plug & Charge,“ V2G Clarity, 25 Únor 2019. [Online]. Available: <https://v2g-clarity.com/knowledgebase/basics-of-plug-and-charge/>. [Přístup získán 16. 4. 2021].
- [16] D. Graovac, M. Pürschel a A. Kiep, „MOSFET Power Losses Calculation using the Data-Sheet Parameters - Application Note,“ Infineon. [Online]. [Přístup získán 20. 4. 2021].
- [17] „Calibration of DS18B20 Sensor With Arduino UNO,“ Instructables, [Online]. Available: <https://www.instructables.com/Calibration-of-DS18B20-Sensor-With-Arduino-UNO/>. [Přístup získán 16. 4. 2021].

- [18] B. Nyland, „Charging speed compared,“ 12 březem 2020. [Online]. Available: tinyurl.com/chargingspeedcompared. [Přístup získán 19. 4. 2021].
- [19] „2018 charging speed compared to battery temp gauge,“ 21 Březem 2018. [Online]. Available: <https://tinyurl.com/nissanleaftempgauge>. [Přístup získán 19. 4. 2021].
- [20] K. Alexandr, Napájecí zdroje III., Praha: BEN - technická literatura, 2011.

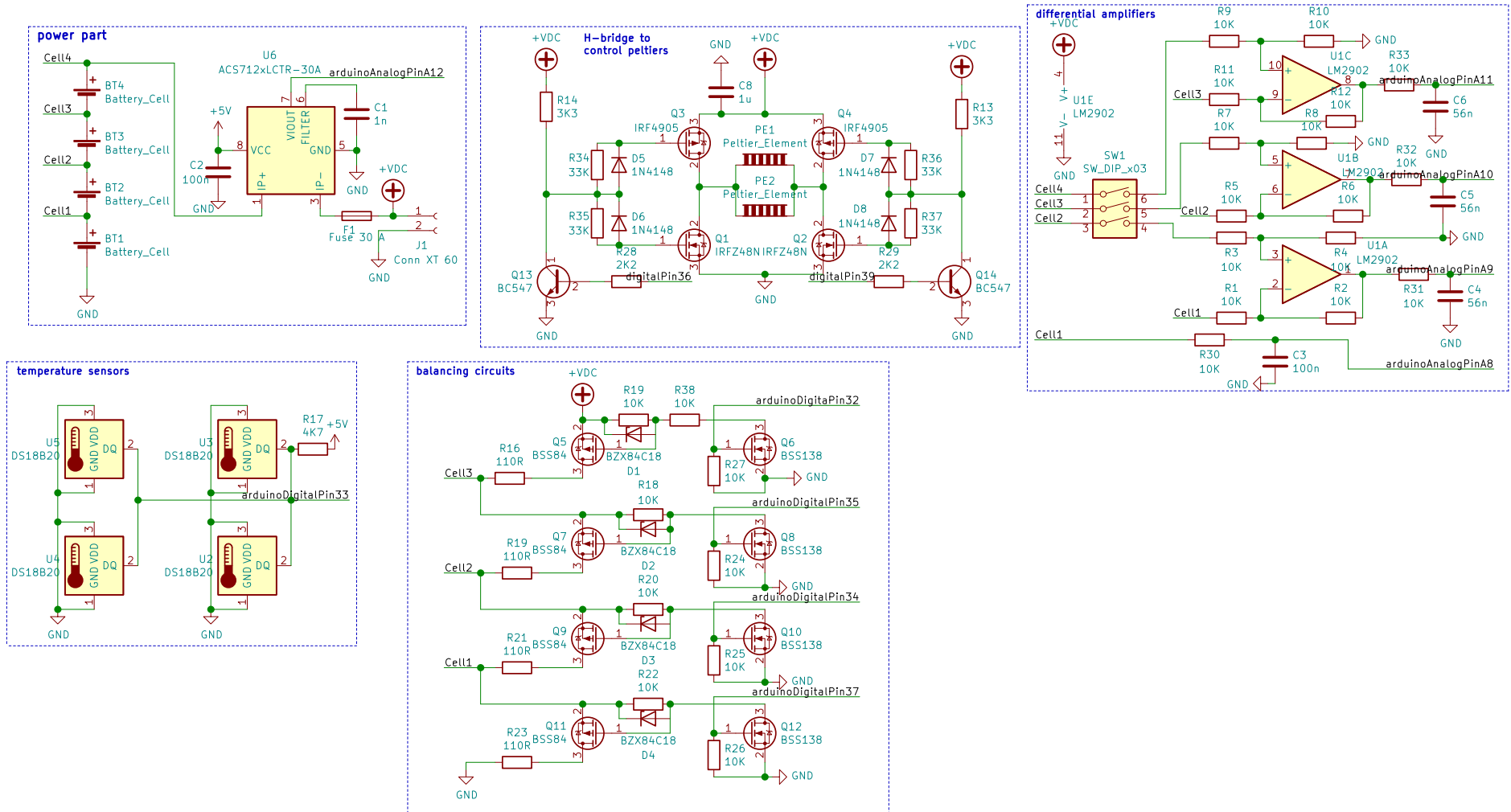
12. Přílohy

12.1. Tabulka vybraných akumulátorů na trhu

kód	výrobce	Kapacita (mAh)	rozměry	energie (Wh)	max. vybíjecí proud(A)	max. nabíjecí proud(A)	teplota min. vybíjení(°C)	teplota max. vybíjení(°C)	cena(Kč)	vnitřní odpor max. (mΩ)	Wh/dm ³	Wh/kg	hmotnost (g)	chemie	C-rating vybíjení	C-rating nabíjení	cena/kWh
NCR18650B	Panasonic	3400	18650	12,24	6,8	1,7	-10	60	175	N/A	697	258	47,5	Li-ion	2,00	0,50	14 297 Kč
INR18650HG2	LG	3000	18650	10,8	20	4	-20	75	175	N/A	615	230	47	Li-ion	6,67	1,33	16 204 Kč
INR18650FL1	LG	3350	18650	12,06	4,9	1,7	-20	50	155	70	687	246	49	Li-ion	1,46	0,51	12 852 Kč
INR18650M26	LG	2600	18650	9,36	10	2,5	-20	60	106	60	533	213	44	Li-ion	3,85	0,96	11 325 Kč
INR2000	Vapcell	2000	18650	7,2	38	N/A	N/A	N/A	190	N/A	410	N/A	N/A	Li-ion	19,00	0,00	26 389 Kč
MJ1	LG	3500	18650	12,6	10	3,4	-20	60	155	40	718	263	48	Li-ion	2,86	0,97	12 302 Kč
NCR18650GA	Sanyo	3500	18650	12,6	10	1,5	-20	60	170	N/A	718	224	48	Li-ion	2,86	0,43	13 492 Kč
VTC5	Sony	2600	18650	9,36	20	3	-20	60	160	13	533	211	44,3	Li-ion	7,69	1,15	17 094 Kč
VTC6	Sony	3000	18650	10,8	30	5	-20	60	199	12,80	615	232	46,5	Li-ion	10,00	1,67	18 426 Kč
INR21700-40T	Samsung	4000	21700	14,4	45	6	-20	60	300	12	579	216	66,6	Li-ion	11,25	1,50	20 833 Kč
NCR20700B	Panasonic	4250	20700	15,3	15	4,25	-20	60	275	N/A	659	224	63	Li-ion	3,53	1,00	17 974 Kč
HHR-80AAA/HT	Panasonic	780	AAA	0,936	N/A	0,75	-10	65	N/A	45	243	72	13	Ni-Mh	N/A	0,96	N/A
HH r-300sCP/F	Panasonic	3050	23x43	3,66	N/A	3	-10	65	N/A	4	205	64	57	Ni-Mh	N/A	0,98	N/A
Nexcell SubC	Nexcel	3300	23x43	3,96	3,3	3,3	-10	60	129	N/A	222	65	61	Ni-Mh	1,00	1,00	32 576 Kč
NANO Tech 900mAh 2S 25C	Nano tech	900	50x26x15,5	6,66	22,5	1,8	-10	60	237	N/A	342	151	44	Li-pol	25	2,00	35 586 Kč
Nano tech	Turnigy	300	45x17x12	2,22	13,5	4,5	-10	60	137	1,2	242	117	19	Li-pol	45	15	61 712 Kč
LG Chem 63 Ah	LG	63000	325x134x11,5	233,1	126	63	0	45	2000	1,8	455	242	965	Li-ion	2	1	8 580 Kč
NPG 10-6	Shimastu	10000	151x50x94	60	10	10	0	40	339	10	85	39	1539	Pb	1	1	5 650 Kč
ZG- LFPO60Ah	GWL	60000	130x186x36	192	180	90	-20	50	1362	2	221	114	1685	LiFePO4	3	1,5	7 094 Kč

12.2. Schéma zapojení přípravku

Battery thermomangement shield



12.3. Hotový model

