



Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroniky a informačních technologií

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

Inteligentní nabíječka Li-Ion akumulátoru s CAN rozhraním

Autor práce: Bc. Ondřej Malena  
Vedoucí práce: Ing. Jiří Žahour, Ph.D.

Plzeň 2021

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2020/2021

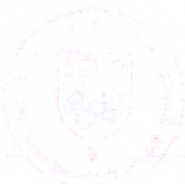
## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej MALENA**  
Osobní číslo: **E18N0027P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**  
Téma práce: **Inteligentní nabíječka Li-Ion akumulátoru s CAN rozhraním**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroniky a informačních technologií**

### Zásady pro vypracování

Navrhněte systém pro nabíjení, balancování a monitoring stavu 3-článekového Li-Ion akumulátoru s kapacitou převyšující 50 Ah. Informace o akumulátoru by měly být dostupné přes sběrnici CAN.

1. Stručně popište problematiku zabývající se nabíjením, balancováním a ochranou Li-Ion akumulátoru.
2. Navrhněte vhodné obvodové zapojení. Pro napájení bude použit stejnosměrný zdroj.
3. Fyzicky vytvořte prototypové zařízení určené pro zástavbu do pásového robota.
4. Navrhněte komunikační protokol po CAN kompatibilní se zbytkem systému. Protokol detailně popište.
5. Zařízení vyzkoušejte, uveďte limitní hodnoty pro bezpečný provoz (proud, teplota, vstupní napětí, atd.).



Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

**Seznam doporučené literatury:**

1. Elektronické napájecí zdroje a akumulátory; Hammerbauer, J.; ZČU; 1998; ISBN 80-7082-411-5

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Žahour, Ph.D.**  
Katedra elektroniky a informačních technologií

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



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



**Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 9. října 2020

# Abstrakt

V této diplomové práci jsou nejprve rozebrány podrobnosti o nabíjení, balancování a ochraně Li-Ion akumulátorů. Také je stručně popsán projekt robotické pásové mobilní platformy. Dále je věnována pozornost vývoji hardwaru inteligentní nabíječky Li-Ion akumulátoru. Ta se skládá ze dvou hlavních částí. Jako první je uveden návrh nabíječky pracující na principu měniče step-down. Druhou částí je battery management systém založený na integrovaném obvodu BQ40Z80. Poté je uveden popis softwaru mikrokontroléru, který zajišťuje řízení obou uvedených funkčních celků a komunikaci po sběrnici CAN. Také je podrobně vysvětlen vytvořený komunikační protokol po sběrnici CAN. V závěrečné části práce je popsána obsluha a limitní hodnoty pro provoz navrženého zařízení.

## Klíčová slova

Nabíječka, BMS, Akumulátor, Li-Ion, CAN, SMBus, BQ40Z80, BQ24725A



# Abstract

Malena, Ondřej. *Smart Li-Ion battery charger with CAN interface [Inteligentní nabíječka Li-Ion akumulátoru s CAN rozhraním]*. Pilsen, 2021. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Electronics and Information Technology. Supervisor: Jiří Žahour

---

In this diploma thesis, the details of charging, balancing and protection of Li-Ion batteries are discussed. The project of a tracked robotic platform is also briefly described. In addition, attention is paid to the development of hardware for smart Li-Ion battery charger. It consists of two main parts. The first part is the design of the charger based on the principle of a step-down converter. The second part is a battery management system based on BQ40Z80 integrated circuit. Then, a description of a microcontroller software is given. Microcontroller provides control of both mentioned units and communication via CAN bus. Created communication protocol via CAN bus is also explained in detail. The final part of diploma thesis describes the use and limit values of the created device.

## Keywords

Charger, BMS, Battery, Li-Ion, CAN, SMBus, BQ40Z80, BQ24725A

## Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 19. května 2021

Bc. Ondřej Malena

.....

Podpis

## Poděkování

Děkuji Ing. Jiřímu Žahourovi, Ph.D. za vedení, pomoc a za rady při vypracování této diplomové práce. Mé poděkování patří rovněž Ing. Josefu Houzarovi a Ing. Patriku Kučerovi za zapůjčení adaptéru EV2400 a Ing. Lukáši Malenovi za poskytnutí laboratorního vybavení. V poslední řadě bych chtěl vyjádřit poděkování Ing. Filipu Zvonařovi za poskytnutí podstatných informací týkajících se mobilní platformy.

# Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Seznam symbolů a zkratk	x
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Akumulátory Li-Ion</b>	<b>3</b>
2.1 Vlastnosti Li-Ion akumulátorů . . . . .	3
2.2 Nabíjení Li-Ion akumulátorů . . . . .	4
2.3 Balancování Li-Ion akumulátorů . . . . .	6
2.3.1 Zapojení článků . . . . .	6
2.3.2 Pasivní balancování . . . . .	6
2.3.3 Aktivní balancování . . . . .	7
2.4 Ochrana Li-Ion akumulátorů . . . . .	7
2.4.1 Ochrany v konstrukci článku . . . . .	8
2.4.2 Ochranné obvody . . . . .	9
<b>3 Robotická pásová mobilní platforma</b>	<b>11</b>
3.1 Modulární přístup . . . . .	11
3.2 Propojení pomocí sběrnice CAN . . . . .	12
3.3 Komunikace po sběrnici CAN . . . . .	13
3.4 Palubní síť a akumulátor . . . . .	14
<b>4 Návrh hardwaru nabíječky a BMS</b>	<b>16</b>
4.1 Nabíječka s BQ24725A . . . . .	16
4.1.1 Návrh obvodového zapojení . . . . .	16
4.1.2 Rozložení komponent na DPS . . . . .	19
4.1.3 Změny v hardware po testování prvního prototypu . . . . .	19
4.1.4 Propojení sběrnicí SMBus . . . . .	21
4.2 BMS s BQ40Z80 . . . . .	22
4.2.1 Návrh obvodového zapojení . . . . .	22

4.2.2	Rozložení komponent na DPS . . . . .	25
4.3	Řídicí mikrokontrolér STM32L476RG . . . . .	26
4.3.1	Programování s využitím ST-Link . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Software modulu napájení</b>	<b>28</b>
5.1	Sběrnice SMBus . . . . .	28
5.1.1	Obecný popis . . . . .	28
5.1.2	Protokol Write Word . . . . .	29
5.1.3	Protokol Read Word . . . . .	30
5.1.4	Protokol Write Block a Read Block . . . . .	30
5.2	Řízení integrovaného obvodu BQ24725A . . . . .	30
5.3	Integrovaný obvod BQ40Z80 . . . . .	31
5.3.1	Úvodní nastavení BQ40Z80 . . . . .	31
5.3.2	Komunikace s BQ40Z80 . . . . .	34
5.4	Program mikrokontroléru . . . . .	36
5.5	Komunikační protokol po sběrnici CAN . . . . .	37
<b>6</b>	<b>Navržené zařízení</b>	<b>41</b>
6.1	Konečná verze modulu správy napájení . . . . .	41
6.2	Obsluha modulu správy napájení . . . . .	42
6.3	Limitní hodnoty pro bezpečný provoz . . . . .	42
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>44</b>
	<b>Reference, použitá literatura</b>	<b>45</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>48</b>
<b>A</b>	<b>Kompletní schéma navrženého zařízení</b>	<b>48</b>
<b>B</b>	<b>Navržené desky plošných spojů</b>	<b>55</b>
B.1	Test prototypu nabíječky BQ24725A . . . . .	55
B.2	Osazená prototypová deska s BQ40Z80 . . . . .	56
B.3	Finální verze desky modulu správy napájení . . . . .	57
<b>C</b>	<b>Práce s programem bqStudio</b>	<b>58</b>
<b>D</b>	<b>Vytvořený komunikační protokol po sběrnici CAN</b>	<b>60</b>
<b>E</b>	<b>Umístění konektorů a tlačítek modulu správy napájení</b>	<b>62</b>
<b>F</b>	<b>CD se soubory projektu</b>	<b>63</b>

# Seznam obrázků

2.1	Typická vybíjecí křivka akumulátoru Li-ion  Převzato z [3]  . . . . .	4
2.2	Průběh napětí a proudu při nabíjení metodou CC/CV  Převzato z [3]  . . . . .	5
2.3	Příklad ochranných mechanismů ve článku 18650  Převzato z [5]  . . . . .	8
2.4	Zjednodušené schéma zapojení BQ2980  Převzato z [7]  . . . . .	9
2.5	Typická aplikace SC Protectoru - pojistky  Převzato z [8]  . . . . .	10
3.1	Blokové schéma mobilní platformy  Převzato z [9] a upraveno  . . . . .	12
3.2	Konektor pro připojení ke sběrnici CAN  Převzato z [12]  . . . . .	13
3.3	Topologie sběrnice CAN  Převzato z [12]  . . . . .	13
3.4	Struktura ID zpráv pro jednotky na sběrnici CAN  Převzato z [11]  . . . . .	14
4.1	Základní schéma měniče step-down – vlevo: průběh po dobu sepnutí spínače, vpravo: průběh po rozepnutí spínače  Převzato z [1]  . . . . .	17
4.2	Typické zapojení integrovaného obvodu nabíječky BQ24725A . . . . .	18
4.3	Zjednodušené schéma Power Path . . . . .	20
4.4	Zapojení integrovaného obvodu BQ40Z80 (bez obvodů pro pasivní balancování) . . . . .	23
4.5	Zapojení pro externí balancování  Převzato z [20] a upraveno  . . . . .	24
4.6	Rozložení komponent vývojového kitu Nucleo  Převzato z [25]  . . . . .	27
5.1	Rozdíl mezi sekvencemi start, stop a repeated start  Převzato z [29]  . . . . .	29
5.2	Formát rámce Write Word  Převzato z [17]  . . . . .	29
5.3	Formát rámce Read Word  Převzato z [17]  . . . . .	30
5.4	Formáty rámců Write Block a Read Block  Převzato z [18]  . . . . .	30
5.5	Rámce pro vyčtení ChemID s využitím přístupu přes ManufacturerBlockAccess . . . . .	35
5.6	Vývojový diagram programu mikrokontroléru . . . . .	36
A.1	Blokové zapojení hlavních částí návrhu . . . . .	49
A.2	Schéma nabíječky s BQ24725A . . . . .	50
A.3	Schéma BMS s BQ40Z80 . . . . .	51
A.4	Schéma mikrokontroléru a s ním souvisejících obvodů . . . . .	52
A.5	Schéma budiče sběrnice CAN . . . . .	53

A.6	Schéma step-down měniče pro napájení větve 3,3 V . . . . .	54
B.1	Testování nabíjení na elektronické zátěži při nastaveném proudu 5120 mA. . . . .	55
B.2	Pohled na horní stranu DPS s battery management systémem BQ40Z80. . . . .	56
B.3	Druhá verze DPS po osazení součástek. . . . .	57
B.4	Hotová DPS vestavěná do útrob mobilní platformy. . . . .	57
C.1	Screenshot z programu bqStudio, kde je zobrazen obsah některých registrů z připojeného BQ40Z80. . . . .	59
E.1	Umístění konektorů a tlačítek modulu správy napájení. U jednotlivých pinů konektoru je uveden název připojeného signálu. Taktéž jsou označena tlačítka pro ovládání MCU a BQ40Z80. Uvedené rozměry DPS a rozteče montážních otvorů jsou v milimetrech. . . . .	62



# Seznam tabulek

2.1	Mezní úrovně napětí Li-Ion podle provedení záporné elektrody [3] . . . . .	4
2.2	Vliv konečného nabíjecího napětí na životnost článků [1] . . . . .	5
3.1	Souhrn identifikátorů používaných při komunikaci . . . . .	14
4.1	Propojení a význam signálů programátoru a modulu napájení . . . . .	26
5.1	Příklady práce s vytvořeným protokolem pro sběrnici CAN . . . . .	40
6.1	Souhrn aktivovaných ochran v rámci BQ40Z80 . . . . .	43
D.1	Souhrn všech zpráv komunikačního protokolu CAN . . . . .	61

# Seznam symbolů a zkratek

ACK .....	Acknowledge. Potvrzení příjmu.
BMS .....	Battery Management System. Systém správy baterie.
CAN .....	Controller Area Network.
CC .....	Constant Current. Konstantní proud.
CD .....	Compact Disc. Kompaktní disk.
CHG .....	Charging. Nabíjení, nabíjecí.
CID .....	Current Interrupt Device. Zařízení pro přerušení proudu.
CV .....	Constant Voltage. Konstantní napětí.
DC .....	Direct Current. Stejnoseměrný elektrický proud.
DPS .....	Deska plošných spojů.
DSG .....	Discharging. Vybíjení, vybíjecí.
ESD .....	Electrostatic discharge. Elektrostatický výboj.
FC .....	Fully Charged. Plně nabito.
HAL .....	Hardware Abstraction Layer. Hardwarová abstraktní vrstva.
I2C .....	Inter-Integrated Circuit.
IC .....	Integrated Circuit. Integrovaný obvod.
ID .....	Identifikátor.
LED .....	Light-Emitting Diode. Elektroluminiscenční dioda.
Li-Ion .....	Lithium-iontový.
MCU .....	Microcontroller Unit. Mikrokontrolér.
MOSFET .....	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor. Tranzistor řízený elektrickým polem.
NACK .....	Not Acknowledge. Nepotvrzení příjmu.
PCB .....	Printed Circuit Board. Deská plošných spojů.
PTC .....	Positive Temperature Coefficient. Kladný teplotní koeficient.
PWM .....	Pulse Width Modulation. Pulzně šířková modulace.
RSOC .....	Relative State of Charge. Relativní stupeň nabití.
SC .....	Self Control.
SMBus .....	System Management Bus.
SOC .....	State of Charge. Stav nabití.
TCA .....	Terminate Charge Alarm. Alarm pro ukončení nabíjení.
ZČU .....	Západočeská univerzita v Plzni.

# 1

## Úvod

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit inteligentní nabíječku Li-Ion akumulátoru s CAN rozhraním. Kromě funkce nabíjení by mělo být navržené zařízení také schopné balancovat a monitorovat stav tříčlánkového Li-Ion akumulátoru. Celé zařízení bude začleněno do robotické pásové mobilní platformy. Získané informace o akumulátoru budou dále zasílány prostřednictvím sběrnice CAN do nadřazeného systému. Tím je počítač, na kterém je spuštěna řídicí aplikace celé mobilní platformy.

Důvodem pro vznik práce bylo vylepšení současného stavu mobilní platformy. V dřívějších dobách byla totiž platforma napájena olověným akumulátorem. Dobíjení akumulátoru a distribuce energie byla řízena modulem správy napájení. Poté však došlo k modernizaci vybavení mobilní platformy, po hardwarové stránce především k výměně řídicího počítače a nahrazení olověného akumulátoru za lithium-iontový. Modul správy napájení byl ze systému zcela vyřazen a nový Li-Ion akumulátor připojen přímo k rozvodu napájení mobilní platformy. Pro nabití akumulátoru je tedy zapotřebí jej nejprve odpojit od systému a poté k němu připojit externí nabíječku. Za provozu navíc nejsou řídicímu softwaru známy žádné informace o akumulátoru, především stav nabití nebo odebíraný proud. Technologie Li-Ion je také citlivá na správné zacházení. Tyto důvody pak vedly ke vzniku požadavku na vytvoření inteligentní nabíječky akumulátoru, respektive modulu správy napájení.

Po přečtení dostupných podkladů a bližším seznámení se s aktuálním stavem mobilní platformy, především co se použitého hardwaru a jeho propojení týče, bylo přistoupeno k návrhu možného řešení. Jako nejvhodnější postup se jevílo rozdělit návrh zařízení na dvě části. Jednak na samotnou nabíječku a dále na systém pro správu akumulátoru. Tyto úlohy jsou totiž většinou řešeny odděleně a tomu také odpovídá nabídka výrobců integrovaných obvodů. S přihlédnutím k požadavkům uvedeným v zadání diplomové práce byly vybrány integrované obvody BQ24725A a BQ40Z80. Prvním zmíněným je nabíječka založená na principu měniče step-down. Obvod BQ40Z80 je pokročilý battery management systém se širokou škálou funkcí.

Po návržení obvodového zapojení byly vytvořeny dva prototypy, každý s jedním z výše zmíněných integrovaných obvodů. Tyto prototypy posloužily k seznámení se s obvody a především k odladění navrženého hardwaru. Následovalo sloučení na jeden plošný spoj

a doplnění o mikrokontrolér, který obstarává kontrolu nad procesem nabíjení a předává informace řídicímu počítači po sběrnici CAN. Na závěr bylo zařízení vestavěno přímo do útroby mobilní platformy a byla ověřena jeho funkce.

# 2

## Akumulátory Li-Ion

### 2.1 Vlastnosti Li-Ion akumulátorů

V poslední době se lithium-iontové akumulátory těší velké oblibě a lze je nalézt ve značném množství aplikací. Jedním z důvodů jejich nasazení je vysoká energetická hustota, díky které lze zařízení miniaturizovat a skvěle se tak hodí pro přenosnou elektroniku. Masivní nasazení je také možné pozorovat v segmentu elektromobility. K dalším příznivým vlastnostem patří malé samovybíjení a absence paměťového jevu. Předností je také velikost jmenovitého napětí jednoho článku, a to přibližně 3,6 V.

Hlavní nevýhodou Li-Ion akumulátorů je stárnutí, které se projevuje jako výrazné snížení kapacity nezávisle na používání. Stárnutí je ovlivněno teplotou skladování. Při běžné pokojové teplotě lze očekávat, že se kapacita bude snižovat až o 20 % za rok. V případě nižších teplot se nebude efekt stárnutí tolik projevovat. Na druhou stranu vyšší teploty prostředí stárnutí výrazně urychlí. Například skladování při teplotě 40 °C bude mít za následek ztrátu kapacity 35-40 % ročně. Životnost je také ovlivněna nabíjecím napětím, hloubkou vybíjení nebo velikostí nabíjecího a vybíjecího proudu.[1]

Li-Ion akumulátorů existuje celá řada. Jednotlivé typy se liší svým chemickým složením. Chemické složení má vliv na výsledné vlastnosti akumulátoru, jako jsou energetická hustota, životnost, bezpečnost nebo chování při nízkých teplotách. Pravděpodobně nejrozšířenějším typem jsou akumulátory LiCoO<sub>2</sub>, které se vyznačují především vysokou energetickou hustotou. Dále můžeme zmínit například typ LiFePO<sub>4</sub>, kde jsou klíčovými vlastnostmi dlouhá životnost a bezpečnost.[2]

Z výše uvedeného vyplývá, že Li-Ion akumulátory jsou dobrým zdrojem elektrické energie, avšak je nutné s nimi správně zacházet. V krajních případech může dokonce dojít k explozi. Aby bylo zamezeno stavům, které jsou pro akumulátor nebo pro uživatele samotného nebezpečné, jsou často články doplněny o ochranné obvody. Správné zacházení s akumulátorem má také pozitivní vliv na jeho životnost. V následujícím textu proto postupně přiblížím postup při nabíjení, balancování a ochraně článků.

## 2.2 Nabíjení Li-Ion akumulátorů

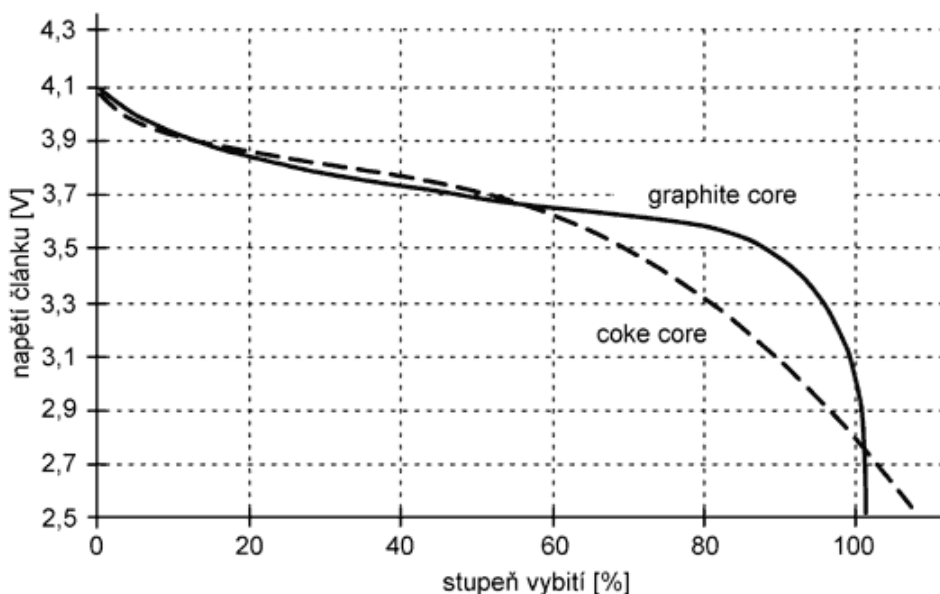
Li-Ion akumulátory můžeme rozdělit do dvou skupin podle provedení záporné elektrody (anody):

- Koks (v anglické literatuře „coke“)
- Grafit (v anglické literatuře „graphite“)

Tyto dvě varianty se od sebe liší maximálním nabíjecím napětím a konečným vybíjecím napětím – viz tabulka 2.1. Nicméně se vyrábějí i akumulátory s grafitovou anodou, které mají napěťové úrovně upraveny tak, aby se shodovaly s anodou z koku. Proto je vždy nejlepší řídit se katalogovým listem od výrobce daného článku. Na obrázku 2.1 je vidět průběh vybíjecí charakteristiky.

Typ	Maximální nabíjecí napětí [V]	Konečné vybíjecí napětí [V]
Koks	4,20	2,50
Grafit	4,10	3,00

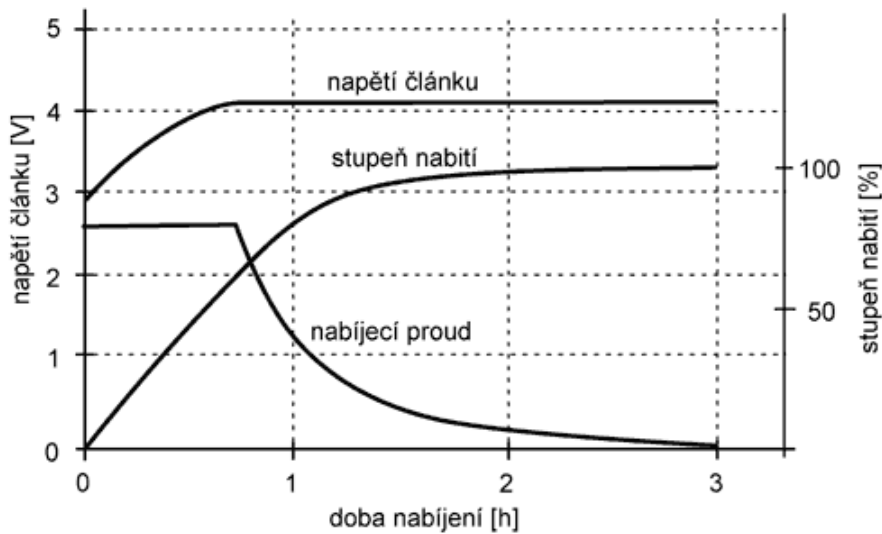
**Tab. 2.1:** Mezní úrovně napětí Li-Ion podle provedení záporné elektrody [3]



**Obr. 2.1:** Typická vybíjecí křivka akumulátoru Li-ion |Převzato z [3]|

Lithium-iontové akumulátory jsou nabíjeny metodou CC/CV (constant current/constant voltage). Nabíjení je tedy rozděleno do dvou fází. První je fáze konstantního proudu, kdy postupně stoupá napětí článku. Pokud napětí článku dosáhne úrovně konečného nabíjecího napětí, vstupuje proces nabíjení do druhé fáze, ve které se udržuje konstantní napětí a postupně klesá proud – obrázek 2.2.

V zájmu prodloužení životnosti článku je potřeba přesně dodržet nabíjecí napětí v rozsahu  $\pm 1\%$ . Napětí 4,20 V (4,10 V pro grafitovou anodu) je kompromisem mezi životností



**Obr. 2.2:** Průběh napětí a proudu při nabíjení metodou CC/CV [Převzato z [3]]

a kapacitou. V případě překročení nabíjecího napětí dochází k významnému zkrácení životnosti akumulátoru.

Pro představu je v tabulce 2.2 uvedena přibližná závislost počtu dosažených cyklů na konečném nabíjecím napětí. Z uvedených hodnot je také zřejmé, že v případě nižšího nabíjecího napětí lze dosáhnout většího počtu cyklů, avšak za cenu nižší kapacity na jedno nabití.

Napětí [V]	Stupeň nabití [%]	Počet cyklů [%]
4,10	85	150
4,20	100	100
4,25	110	70

**Tab. 2.2:** Vliv konečného nabíjecího napětí na životnost článků [1]

Co se velikosti nabíjecího proudu týče, běžně udávané hodnoty se pohybují v rozsahu 0,1-2 C, kde C je tzv. C-rate [ $h^{-1}$ ]. Nabíjecí proud v ampérech se tedy vypočte vynásobením jmenovité kapacity akumulátoru s C-rate. Samozřejmě je možné nabíjet i nižším proudem, nabíjení však bude trvat déle.

V případě, že byl článek hluboce vybitý, se nejprve nabíjí velice nízkým proudem (jednotky mA) a to až do okamžiku, kdy napětí na článku vzroste na 2,7-3 V. Poté proces pokračuje podle průběhu na obrázku 2.2.

Za ukončené lze považovat nabíjení, kdy proud ve druhé fázi (konstantní napětí) klesne na zlomek původní hodnoty, přibližně se udává 0,05 C. [3]



## 2.3 Balancování Li-Ion akumulátorů

### 2.3.1 Zapojení článků

Pro mnoho aplikací jsou parametry jediného článku nedostatečné. Přistupuje se proto k využití více článků, které mohou být různě zapojeny a vzniká tak akumulátorová sestava.

- Sériové spojení vede k dosažení vyššího napětí. Výše napětí se odvíjí od počtu článků zařazených v sérii.
- Paralelním spojením se zvyšuje celková kapacita. Toto spojení také dovoluje nabíjet nebo vybíjet vyššími proudy, než by bylo možné u samotného článku.
- Sérioparalelní spojení – jedná se o kombinaci výše zmíněných způsobů řazení článků. Výsledné zapojení se označuje například 4S2P, kde 4 je počet článků řazených do série a 2 je počet paralelních článků.

Na první pohled by spojení článků do sestavy mělo přinášet pouze výhody. Opak je bohužel pravdou. Žádné dva články nejsou stejné, ať už vlivem výrobních tolerancí nebo mírně odlišného chemického složení. To ve svém důsledku vede k rozdílům ve stavu nabití, kapacitě nebo vnitřní impedanci jednotlivých článků. Při výrobě sestav je proto nejlepší použít články od jednoho výrobce, které byly vyrobeny v rámci jedné série a ideálně po sobě jdoucí kusy. Tím se minimalizuje odlišnost mezi články daná výrobním procesem. I přesto dále v průběhu životnosti sestavy dochází ke změně parametrů jednotlivých článků. Ve výsledku může docházet ke zkrácení životnosti celé sestavy či k poklesu využitelné kapacity. [4]

K potlačení uvedených nedostatků se využívá balancování. Cílem tohoto procesu je vyvážení napěťových rozdílů mezi články. Důvodů, kvůli kterým vzniká napěťová nevyváženost mezi články je celá řada. Jako příklad můžeme uvést sestavu, ve které má jeden článek nižší celkovou kapacitu než zbylé články. Při dobíjení se tento článek dobíjí nejrychleji a jako první dosáhne úrovně napětí 4,2 V. Nabíjení ovšem není ukončeno, protože výsledné napětí sestavy je stále v přijatelných mezích. Ostatní články s nižším napětím totiž „zamaskují“ zvýšené napětí jednoho článku. Tímto způsobem dochází k dalšímu zvyšování napětí na článku s nižší kapacitou. Zvýšené napětí má za následek degeneraci uvedeného článku.

Existují dva způsoby balancování, pasivní a aktivní. Jejich popis a vzájemné srovnání je uvedeno dále v 2.3.2 a 2.3.3.

### 2.3.2 Pasivní balancování

V případě pasivního balancování se využívá maření přebytečného náboje v odporech. Ke každému článku je paralelně připojen přes spínač výkonový rezistor. Spínání spínačů, kterými jsou nejčastěji výkonové tranzistory MOSFET, řídí algoritmus balancování. V okamžiku sepnutí spínače začne téct proud ze článku do rezistoru, kde je přebytečná energie

mařena na teplo. Vyzářené teplo je potřeba brát v úvahu zejména u rozsáhlých systémů s mnoha sériovými články, kde by mohla nastat potíž s jeho odvodem.

Výhodou tohoto systému je jednoduché obvodové zapojení za využití levných komponent. Také se nezvyšuje složitost obvodového zapojení s rostoucím počtem článků. Metoda je často použita u levnějších aplikací nebo tam, kde není požadavek na vysoký proud při balancování. Obecně je však snaha o co nejlepší využití energie, která je ve člancích dostupná. V tomto ohledu jednoznačně převažuje aktivní balancování.

Konkrétní způsob zapojení je uveden v podkapitole 4.2.1 na obrázku 4.5.

### 2.3.3 Aktivní balancování

Při aktivním balancování se využívá přenosu energie mezi články, nikoliv jejího maření. Způsob, kterým se energie přesouvá, je založen na principu spínaných zdrojů. Z pohledu prvku, který se podílí na přenosu energie, lze aktivní balancéry rozdělit do dvou skupin. Kapacitní, kde se na přenosu energie podílí kondenzátory, dosahuje účinnosti přibližně 50 %. Konverze je navíc závislá na napěťových úrovních článků. Druhým a efektivnějším způsobem je induktivní balancér. Dosahuje účinnosti až 90 %, jeho činnost není závislá na napětí článků a navíc je možné (podle zapojení měniče) přenášet energii i v opačném směru, tedy ze článku s nižším napětím.[4]

Zřejmé výhody aktivního balancování jsou však vykoupeny vyšší obvodovou složitostí. V mnoha zapojeních se navíc místo jednoduchých indukčností objevují i transformátory s několika vinutími. To zvyšuje jednak celkovou cenu řešení, ale také prostor na DPS nutný pro umístění komponent.

## 2.4 Ochrana Li-Ion akumulátorů

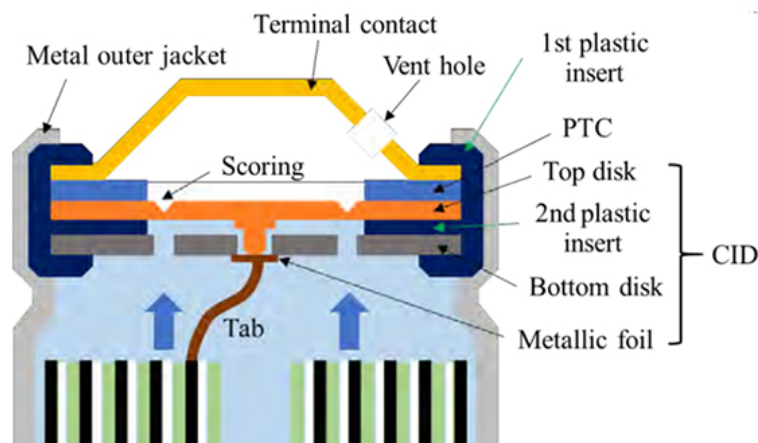
Stále více typů zařízení se v dnešních dnech vyrábí jako přenosné a pro mnoho z nich slouží jako zdroj energie právě Li-Ion akumulátory. Tato zařízení nás obklopují v každodenním životě, ať už se jedná o mobilní telefony, powerbanky, elektrokola, drony nebo třeba e-cigarety. Není to dávno, co svět obletěla kauza spjatá s požáry způsobenými vadnou konstrukcí baterie v mobilním telefonu Note 7. K selhání může dojít z více možných příčin. Způsobit jej může i mechanické poškození, přebíjení, přehřátí nebo zkrat. Důsledkem těchto stavů může být prudké přehřátí článku a při překročení určité teplotní meze dochází k dalšímu nekontrolovatelnému generování tepla, jehož příčinou jsou exotermické reakce uvnitř článku. Z důvodu vysoké teploty navíc dochází ke tvorbě plynů, které zvyšují tlak ve článku. To vše může vést až k explozi nebo požáru. Ochranou akumulátorů se tedy v první řadě zabýváme z důvodu bezpečnosti, dále pak kvůli zamezení stavů, kdy dochází k jejich znehodnocení.

### 2.4.1 Ochrany v konstrukci článku

Několik bezpečnostních opatření je zabudováno výrobcem přímo do samotného článku. Jsou to především PTC termistory, CID (current interrupt device) a bezpečnostní ventily.

Úkolem PTC termistoru je snížit průtok proudu v případě, že nastane externí zkrat. Při zkratu totiž roste teplota článku a PTC termistor začne zvyšovat svůj odpor, tím je dosaženo snížení velikosti protékajícího proudu a poklesu teploty. Tato ochrana je vratná, při poklesu teploty se termistor navrácí k původní nízké hodnotě odporu a nebrání tak průchodu proudu. Situace se ale komplikuje v případě většího počtu sériově řazených článků. Pokud dojde ke zkratu série článků, tak se na prvním termistoru, který zvýší svůj odpor, může vytvořit vyšší napětí, než na které je tento termistor dimenzován. Ve výsledku dojde ke zkratu tohoto termistoru a stejným způsobem dochází k postupnému selhání u dalších článků v sériovém spojení.

CID, volně přeloženo jako zařízení pro přerušování proudu, trvale zastaví průtok elektrického proudu článkem. Podle provedení může být CID aktivováno teplotou, tlakem nebo obvody zajišťujícími ochranu akumulátoru. Na obrázku 2.3 lze vidět příklad CID reagujícího na tlak, konkrétně uvnitř hojně rozšířených článků 18650. Při tlaku okolo 1000 kPa dojde k přerušování obvodu, a to deformací ventilu a jeho rozpojením od metalické fólie (na obrázku 2.3 oranžovou a hnědou barvou). Zároveň dojde k úniku nahromaděných plynů. V případě jednoho článku je CID spolehlivým bezpečnostním mechanismem. Problémem je opět sériové řazení, kdy kvůli zvýšenému napětí a přítomnosti plynů může dojít k zapálení oblouku v oblasti CID a je tak nadále umožněn průchod proudu skrz článek. [6]



**Obr. 2.3:** Příklad ochranných mechanismů ve článku 18650 |Převzato z [5]|

Další ochranou jsou bezpečnostní ventily, které snižují tlak uvnitř článku a předcházejí tak jeho explozi. Provedení u cylindrických článků lze vidět na obrázku 2.3. U prizmatických článků často slouží jako ventil zapečetěný otvor v jejich plášti.

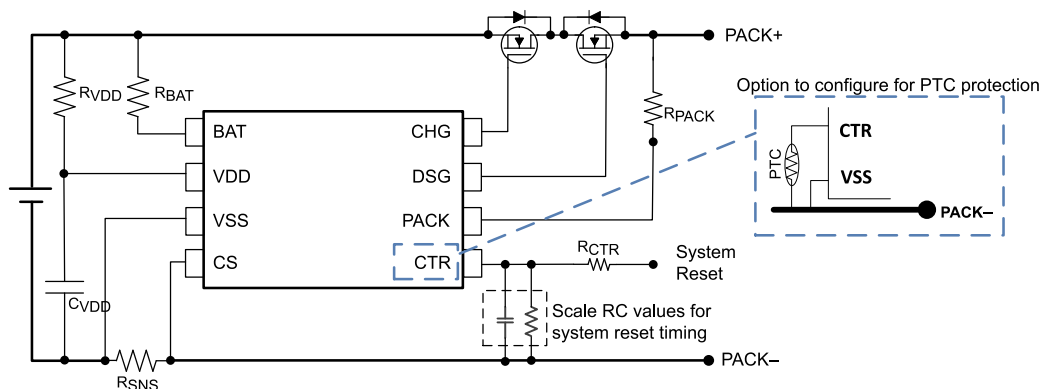
Podle zdroje [6] tyto bezpečnostní prvky ne vždy fungují na 100 %. V případě aktivace CID je článek nenávratně zničen. Je proto vhodné doplnit další ochrany, které jsou řešeny jako elektronické obvody vně článku.

## 2.4.2 Ochranné obvody

Ochranné obvody mohou mít mnoho podob. Ty nejzákladnější z nich hlídají minimální a maximální napětí. Tím se předchází přílišnému podbití nebo přebití článku. Také je případně kontrolován maximální vybíjecí a nabíjecí proud. Pokud jsou některé z těchto mezí překročeny, obvod článek odpojí. Obvod může být přímo součástí článku. Například u cylindrických článků je umístěn jako malá kruhová destička na záporném pólu. Takto vybavené články často nesou označení „protected“ nebo „with PCB“. Lze je poznat tak, že jsou o 2-3 mm delší než články bez elektroniky. Elektronika neustále z článku odebírá proud, ten je ale velice malý, v jednotkách mikroampér.[1]

Pro představu můžeme uvést například battery protector BQ2980 z portfolia Texas Instruments sloužící k ochraně jednoho článku. Tento integrovaný obvod zajišťuje ochranu proti přepětí, podpětí, nadproudu při vybíjení, nadproudu při nabíjení, zkratu a příliš vysoké teplotě článku. Při pohledu na základní zapojení 2.4 vidíme dva antisériově zapojené tranzistory MOSFET. Každý tranzistor blokuje průchod proudu pouze v jednom směru, ve směru druhém může proud protékat skrz substrátovou diodu. Tranzistor připojený k výstupu CHG znemožňuje nabíjení, druhý, připojený k vývodu DSG, naopak vybíjení. V závislosti na typu poruchy je buď uzavřen jeden nebo oba tranzistory. Například při přepětí při nabíjení je uzavřen pouze CHG tranzistor. Pokud poruchový stav pomine, navrácí se obvod do normálního stavu a oba tranzistory jsou otevřené, tím je umožněn průchod proudu oběma směry. Není v našem zájmu, aby proud tekla skrz substrátovou diodu. Dioda jednak nemusí vydržet požadovaný proud, navíc na ní vzniká úbytek napětí a s tím spojené ztráty.

Úbytek napětí na rezistoru  $R_{SNS}$  slouží ke snímání velikosti protékajícího proudu. Integrovaný obvod je uzpůsoben k použití měřicího rezistoru o velikosti 1 mΩ. Dále uvnitř obsahuje teplotní senzor, který při nadměrném zvýšení teploty článku způsobí zavření obou tranzistorů. Pin CTR je multifunkční, buď může sloužit k ovládání tranzistorů, nebo k připojení PTC termistoru, kterým lze hlídat teplotu MOSFETů.[7] Zbylé pasivní součástky ve schématu slouží především k ochraně IC samotného a nebudu se proto zabývat popisem jejich funkce.

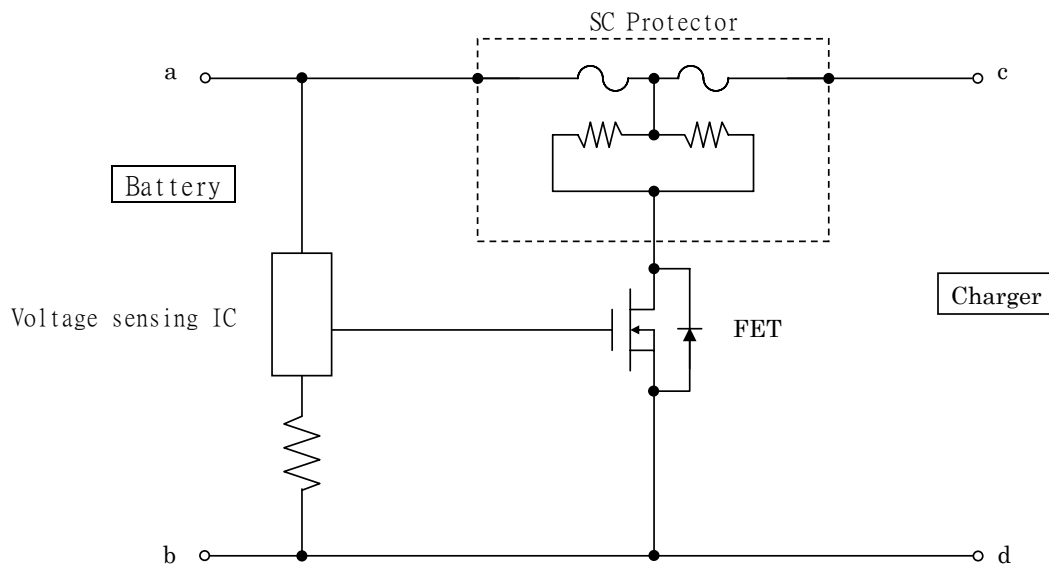


**Obr. 2.4:** Zjednodušené schéma zapojení BQ2980 |Převzato z [7]|

Dalším ochranným prvkem jsou pojistky, v anglické literatuře označované jako „chemical fuse“ nebo „SC protector“ (Self Control Protector). Jedná se o součástku se třemi vývody, která má podobnou funkci jako běžná pojistka. Na obrázku 2.5 je vidět náhradní schéma součástky a příklad typického zapojení. Tato ochrana může odpojit akumulátor od zátěže nebo nabíječky dvěma způsoby. Pokud mezi body *a* a *c* prochází nadměrný proud, dojde k přetavení pojistky. V tomto případě je funkce shodná s běžnou tavnou pojistkou. Ve druhém případě lze přetavení pojistky ovlivnit vnějším signálem. Otevřením tranzistoru začne protékat proud přes topná tělíska, která se začnou zahřívat (na obrázku 2.5 znázorněná jako dva rezistory). Zahřátí způsobí přetavení pojistky. K dalšímu zahřívání topných tělísek už nedochází, protože po přetavení pojistky neexistuje cesta, kudy by proud protékal.

Otevření tranzistoru může být řízeno i větším počtem externích obvodů, které jsou na sobě nezávislé. Zmíňme například integrované obvody z řady BQ7718xy, které zajišťují právě přepětovou ochranu pro 2 až 5 sériově řazených článků. V případě přepětí některého ze článků se spustí časovač, pokud i po definované době přepětí stále trvá, je aktivován řídicí signál pro přetavení pojistky.

Důvodem nasazení této sekundární ochrany je další zvýšení bezpečnosti. Pokud by došlo k selhání dříve uvedených ochranných obvodů nebo nabíjecích a vybíjecích MOSFET tranzistorů, nebylo by možné zabránit přebíjení. Samozřejmě ještě vstupují v úvahu ochranné mechanismy uvnitř samotné konstrukce článku. Ty jsou však závislé na teplotě a tlaku, jak již bylo zmíněno dříve, tím pádem mají značnou setrvačnost. Reakce pojistky v kombinaci s ochranným obvodem je daleko rychlejší. [8]



**Obr. 2.5:** Typická aplikace SC Protectoru - pojistky [Převzato z [8]]

# 3

## Robotická pásová mobilní platforma

Projekt robotické pásové mobilní platformy má na ZČU dlouholetou tradici. Od svého začátku prošel významným vývojem a byl předmětem mnoha diplomových prací. Dnešní podoba mobilní platformy připomíná svým vzhledem tank s obdélníkovou základnou o rozměrech přibližně  $75 \times 45$  cm a hmotností 25 kg. V minulém roce byl navíc tank doplněn o otočnou věž, na jejímž vrcholu se nachází senzor Microsoft Kinect. V útrokách tanku jsou umístěné veškeré hardwarové komponenty nutné pro provoz – nejlepší přehled poskytuje obrázek 3.1. Detailnější popis lze nalézt na webových stránkách věnovaných tomuto projektu [9].

Jak již bylo zmíněno, předmětem této diplomové práce je tvorba modulu správy napájení Li-Ion akumulátoru. Před začátkem návrhu jsem se proto rozhodl prostudovat předchozí diplomové práce, abych porozuměl dosavadní koncepci. Tyto diplomové práce jsou uvedeny v seznamu literatury pod čísly [10],[11],[12],[13] a lze je dohledat na stránkách Digitální knihovny Západočeské univerzity v Plzni nebo na pevném disku mobilní platformy.

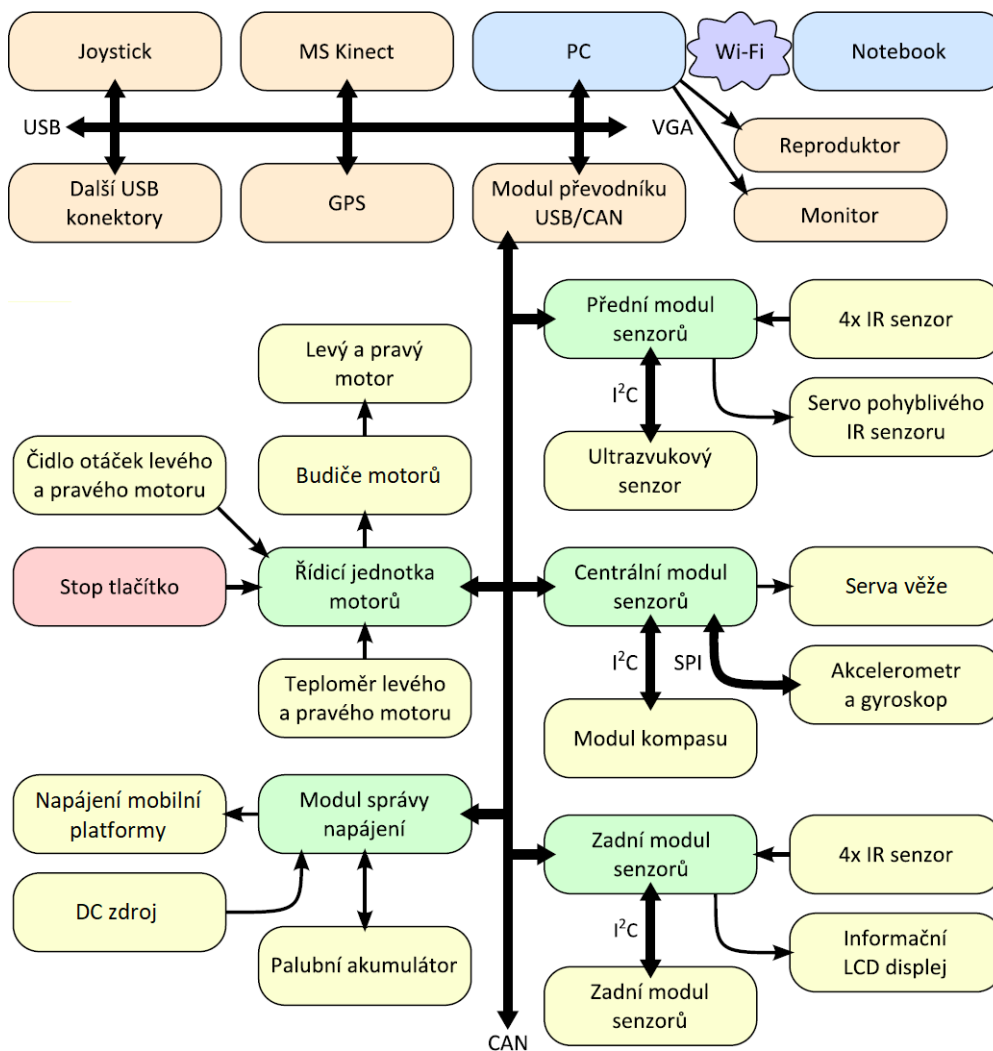
Tato kapitola shrnuje základní znalosti nutné pro vytvoření nového modulu a může tak pomoci budoucím studentům při jejich tvorbě.

### 3.1 Modulární přístup

V následujícím textu se věnuji souboru doporučení, která vyplývají z předchozích diplomových prací. Při tvorbě nových modulů nebo úprav stávajících je vhodné se těmito doporučeními řídit, aby byla zachována jejich jednotná podoba a práce s nimi byla co nejvíce usnadněna.

Nejvýznamnějším kritériem je zachování modulárního přístupu. To v praxi znamená, že celý systém je sestaven z bloků, které realizují jednotlivé funkce. Tyto bloky jsou propojeny s řídicím počítačem pomocí sběrnice CAN, způsob tohoto propojení je popsán v 3.2.

Z hlediska hardwarového návrhu modulu je nutné myslet na to, aby se modul do konstrukce mobilní platformy vešel, byl umístěn na vhodném místě a aby bylo možné



Obr. 3.1: Blokové schéma mobilní platformy [Převzato z [9] a upraveno]

jej spolehlivě připevnit, např. distančními sloupky. Také by mělo být zvaženo vhodné rozmístění konektorů na modulu, aby k nim byl dobrý přístup i po montáži celé DPS do mobilní platformy.

Jelikož jsou mezi sebou dílčí projekty provázány a často se stává, že jeden student navazuje na práci druhého o několik let později, je potřeba vytvořit kvalitní dokumentaci. Z hlediska hardwaru je vhodné popsat umístění daného modulu v platformě a rozmístění konektorů na DPS. Také je vhodné uvést význam či funkci jednotlivých pinů těchto konektorů. Z hlediska softwaru je třeba dobře zdokumentovat zdrojový kód každého modulu a připojit vývojový diagram. V poslední řadě také zachovat a detailně popsat komunikační protokol po sběrnici CAN, který je kompatibilní se zbytkem systému – viz 3.3 a 5.5.

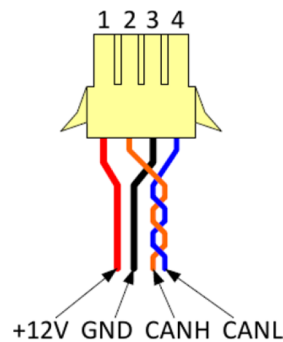
### 3.2 Propojení pomocí sběrnice CAN

Každý modul je osazen dvojitým konektorem WAGO 734-404, do kterého se zapojuje protikus znázorněný na obrázku 3.2. Tímto způsobem je modul připojen na sběrnici CAN –

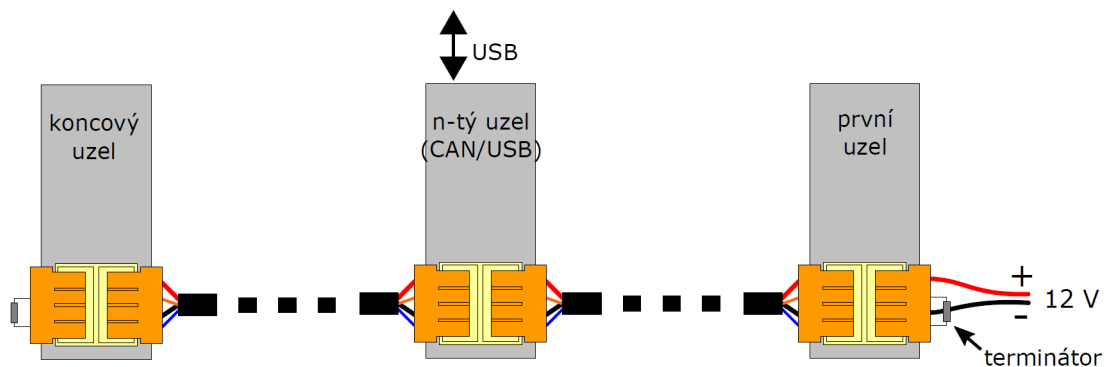


vodiče CANH a CANL připojeny k pinům 2 a 4. Zbývající dva volné piny slouží k rozvodu napájení +12 V a zem. Nutno podotknout, že se nejedná o „stabilizované“ napětí, jelikož jsou tyto vodiče připojeny přes modul správy napájení k akumulátoru. Napětí tedy bude kolísat v závislosti na nabití akumulátoru v rozmezí přibližně 9 až 12,6 V.

Ze znázornění na obrázku 3.3 můžeme vidět, jak jsou ke sběrnici připojené jednotlivé uzly. Signál vstupuje do daného uzlu a zároveň pokračuje do dalšího uzlu prostřednictvím dvojitého WAGO konektoru a tak se šíří celým řetězcem. Při přidávání nových modulů je tedy zapotřebí toto pravidlo dodržet. Oba konce sběrnice musí být zakončeny terminátory o impedanci 120 Ω. K řídicímu počítači je sběrnice připojena přes převodník CAN/USB.



Obr. 3.2: Konektor pro připojení ke sběrnici CAN [Převzato z [12]]

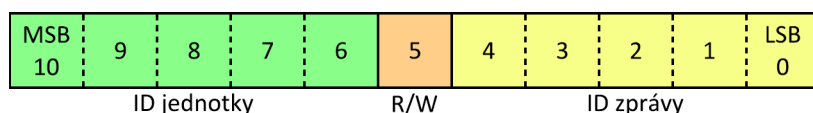


Obr. 3.3: Topologie sběrnice CAN [Převzato z [12]]

### 3.3 Komunikace po sběrnici CAN

Úspěšné navázání komunikace mezi hlavním počítačem a modulem je podmíněno dodržáním zavedených pravidel. Prvním z nich je přenosová rychlost shodná pro všechny zúčastněné moduly, a to 100 kbit/s. Další podmínkou je použití 11-bitového ID podle standardu CAN 2.0A. Komunikační protokol řídicí jednotky motorů a tří sensorových modulů je přehledně popsán v [11]. Jelikož modul správy napájení také komunikuje po sběrnici CAN, vysvětlím zde způsob vytvoření nového identifikátoru.

Jednotka motorů využívá pro svou funkci celkem 6 pevně daných 11-bitových identifikátorů. Moduly senzorů ale využívají identifikátor jiným způsobem. Dělí jej do třech částí. Z nich první část, tedy nejvyšších 5 bitů, zůstává neměnná. Tato část je vyhrazena jako ID jednotky. Bit R/W určuje směr přenosu (0 – zpráva se čte z modulu, 1 – zpráva se zapisuje do modulu). Nejnižších 5 bitů určuje typ zprávy. Strukturu popisuje obrázek 3.4. V případě senzorových modulů se tedy nejnižších 6 bitů identifikátoru může libovolně měnit.



**Obr. 3.4:** Struktura ID zpráv pro jednotky na sběrnici CAN [Převzato z [11]]

Souhrn vyhrazených identifikátorů je uveden v tabulce 3.1. První sloupec obsahuje název jednotky. Druhý sloupec obsahuje kompletní 11-bitové ID pouze pro jednotku motorů. Třetí sloupec obsahuje nejvyšších 5 bitů ID jednotek senzorů a napájení, které se řídí strukturou uvedenou na obrázku 3.4. Nejucelenější pohled poskytuje čtvrtý sloupec, kde lze vidět kompletní 11-bitové ID v binárním zápisu, kde znak „X“ značí, že bit na dané pozici může nabývat obou hodnot. V případě jednotky napájení byl použit princip dříve popsany a jednotce bylo přiřazeno ID 0x0E. Toto ID bylo zvoleno také z důvodu nižší priority při arbitráži, jelikož je proces nabíjení řízen jednotkou automaticky a není tak kladen vysoký nárok na co nejrychlejší odvěsání zpráv.

Jednotka	ID 11 bit (hex)	ID 5 bit (hex)	ID 11 bit (bin)
Řídicí jednotka motorů	0x064	-	000 0110 0100
	0x00A	-	000 0000 1010
	0x020	-	000 0010 0000
	0x065	-	000 0110 0101
	0x01E	-	000 0001 1110
	0x01F	-	000 0001 1111
Přední jednotka senzorů	-	0x0B	010 11XX XXXX
Střední jednotka senzorů	-	0x0C	011 00XX XXXX
Zadní jednotka senzorů	-	0x0D	011 01XX XXXX
Jednotka napájení	-	0x0E	011 10XX XXXX

**Tab. 3.1:** Souhrn identifikátorů používaných při komunikaci

### 3.4 Palubní síť a akumulátor

Před zahájením úprav bylo nejprve zjištěno, jak je ve skutečnosti proveden rozvod napájení v mobilní platformě. Z akumulátoru jsou vedeny vodiče k hlavnímu vypínači. Odtud se síť rozvětjuje do několika svazků vodičů. Zdroj pro počítač je napájen neustále, nezávisle na poloze hlavního vypínače. Tank tedy odebírá proud i ve zdánlivě vypnutém

stavu, přibližně 0,7 mA. Po zapnutí hlavního vypínače dochází k automatickému zapnutí počítače a spuštění napájení do celého systému. Lze odlišit větev pro napájení jednotek senzorů (vedenou společně se sběrnici CAN), větev pro PC zdroj a vodiče pro napájení motorů. Pokud nedochází k pohybu tanku, kolísá proudový odběr mezi 2 a 4 A. Po vypnutí hlavního vypínače dochází k okamžitému přerušení napájení pro celý systém, až na výjimku PC zdroje. Ten je aktivní dokud nedojde k bezpečnému vypnutí počítače. Poté se zdroj přepne do režimu snížené spotřeby.

Modul správy napájení je vložen právě mezi akumulátor a hlavní vypínač. Je tak možné snímat veškerý proud, který je platformou odebírán, monitorovat stav akumulátoru a zajistit jeho dobíjení.

Energie pro provoz tanku je poskytována Li-Ion akumulátorem o rozměrech přibližně  $17 \times 15 \times 14$  cm. Ten má kapacitu 108 Ah a jmenovité napětí 10,8 V. Je složen ze 144 Li-Ion článků Panasonic CGR18650CH v konfiguraci 3S48P. Kapacita jednoho článku je 2250 mAh. Další podrobné informace o článcích byly získány z katalogového listu [14]. Dále byl akumulátor doplněn o NTC termistor  $10 \text{ k}\Omega$  (typ NTCLE413E2103F520L), aby bylo možné snímat teplotu článků.

# 4

## Návrh hardwaru nabíječky a BMS

Cílem práce je vytvořit systém pro nabíjení, balancování a monitoring stavu 3-článekového Li-Ion akumulátoru s kapacitou převyšující 50 Ah. Po prostudování portfolia různých výrobců, zejména pak rozsáhlé nabídky Texas Instruments, bylo rozhodnuto o rozdělení výsledného obvodového řešení na dvě části. V první řadě je to využití integrovaného obvodu BQ24725A, určeného pro nabíjení různých druhů akumulátorů. Druhou část, tedy monitoring stavu a balancování, obstarává BMS (Battery Management System) BQ40Z80. Nejdříve byly navrženy dva na sobě nezávislé moduly, jejichž funkce byla otestována. Dále bylo přistoupeno k jejich vzájemnému propojení a zakomponování do mobilní platformy. Předávání dat mezi nabíječkou, BMS a řídicím počítačem mobilní platformy je zajištěno pomocí mikrokontroléru STM32L476RG. Návrh hardwaru všech modulů je předmětem právě této kapitoly.

### 4.1 Nabíječka s BQ24725A

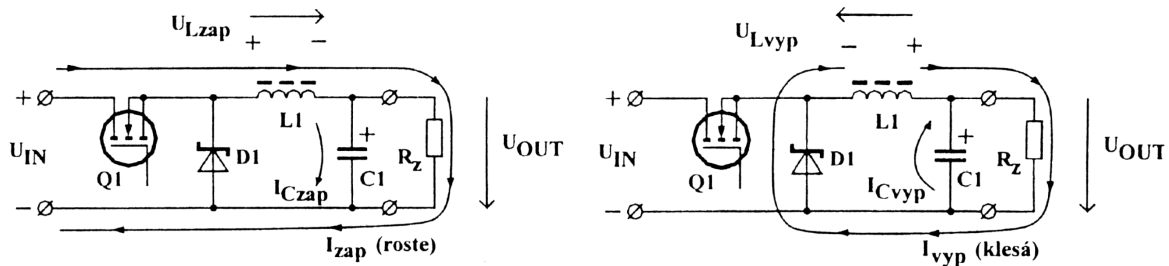
Důvodů pro volbu integrovaného obvodu BQ24725A bylo hned několik. Jedná se o vysoce účinné řešení pro dobíjení jednoho až čtyř lithiových článků. Vysoká účinnost je dána použitím spínaného snižujícího měniče topologie step-down. Díky tomu lze dobíjet proudem až 8 A. Relativně vyšší hodnota nabíjecího proudu byla požadavkem vzhledem k vysoké kapacitě akumulátoru a z toho plynoucí doby pro jeho dobití. Zároveň nabíječka umožňuje pestré možnosti nastavení po sběrnici SMBus a dobrou kontrolu nad procesem nabíjení. Samozřejmostí je dobíjení v režimu CC/CV.

#### 4.1.1 Návrh obvodového zapojení

Dále bude vysvětlen princip funkce a důvod použití jednotlivých komponent. Na obrázku 4.1 je základní schéma měniče step-down. K přenosu energie ze vstupu na výstup využívá dobu aktivního intervalu  $T_a$ , tedy dobu sepnutí spínače  $Q_1$ . Přes L1 teče proud  $I_{zap}$  ze vstupního do výstupního obvodu. Na svorkách L1 je napětí  $U_{in} - U_{out}$ , předpokládáme-li bezztrátový měnič. Zvětšování proudu má lineární průběh.

V intervalu  $T_b$  je spínač rozepnut. V tomto intervalu je zátěž napájena energií akumulovanou v L1. Proud se uzavírá přes rekuperační diodu D1. Pokles proudu  $I_{vyp}$  je opět lineární. Výstupní napětí je dáno vztahem 4.1 a je určeno poměrem period, kde  $T_c$  je  $T_a + T_b$ . Řízení měniče je většinou provedeno pomocí PWM a dosahuje se velmi vysoké účinnosti. [15]

$$U_{out} = U_{in} \frac{T_a}{T_c} \quad [V] \quad (4.1)$$



**Obr. 4.1:** Základní schéma měniče step-down – vlevo: průběh po dobu sepnutí spínače, vpravo: průběh po rozepnutí spínače [Převzato z [1]]

BQ24725A využívá k dobíjení akumulátorů stejného principu. Funkci spínače zastává na schématu 4.2 tranzistor Q3, namísto rekuperační diody je tranzistor Q4. Výhodou použití tranzistoru místo diody je menší výkonová ztráta, která je dána nízkým odporem kanálu v sepnutém stavu. Do zátěže teče proud skrz induktor L1 a rezistor RSR.

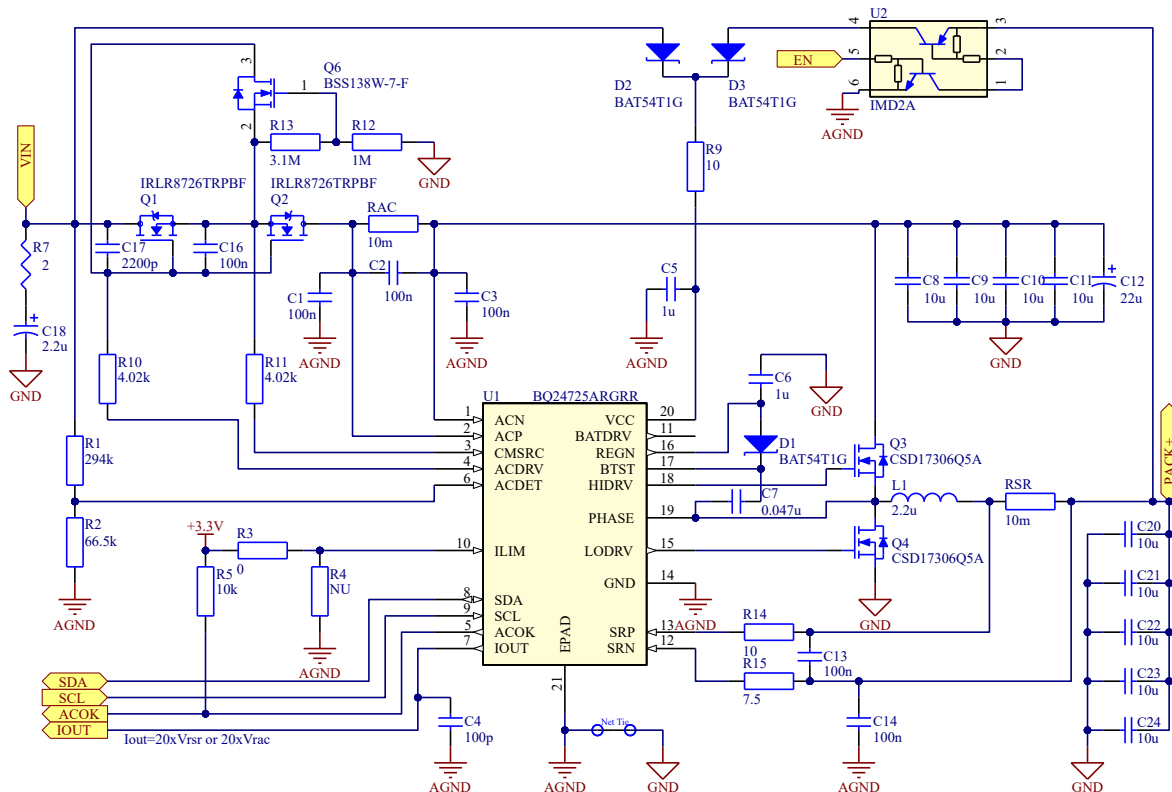
Důležitým prvkem jsou výstupní kondenzátory C20 až C24. Ty spolu s L1 tvoří filtr, jehož rezonanční frekvence je dána Thomsonovým vztahem. Pro správnou funkci měniče je zapotřebí volit rezonanční frekvenci v rozmezí 10-20 kHz. Pro dobíjecí proud 8 A je výrobcem doporučena indukčnost  $2,2 \mu\text{H}$ . Z Thomsonova vzorce jednoduše dopočteme potřebnou kapacitu kondenzátoru, přibližně  $40 \mu\text{F}$ . Keramické kondenzátory však vykazují dost významnou změnu kapacity s napětím (DC-bias). V případě použití čtyř paralelně spojených kondenzátorů  $10 \mu\text{F}$  v pouzdře 0805 by při napětí 12 V jejich kapacita poklesla o 80 %. Řešením je navýšení jejich počtu, ale především změna pouzdra. Zdroj [16] totiž jasně ukazuje, že s rostoucí velikostí pouzdra se změna kapacity projevuje méně. Proto byla zvolena paralelní kombinace pěti kondenzátorů  $10 \mu\text{F}$  v pouzdře 1210, která při napětí 12 V skutečně odpovídá požadované kapacitě  $40 \mu\text{F}$ .

Pro otevření tranzistorů s kanálem typu N je potřeba, aby napětí na gate bylo vyšší než napětí na source. Integrovaný obvod (U1) obsahuje lineární zdroj napětí 6 V vyvedený na výstup REGN. Source tranzistoru Q4 je uzemněn. Pro otevření Q4 je na výstup LODRV (hradlo Q4) přivedeno právě napětí z interního regulátoru, pro zavření je hradlo uzemněno. Otvírání tranzistoru Q3 musí být ale vyřešeno jiným způsobem. Opět potřebujeme napětí vyšší, než je napětí na source tranzistoru Q3 (uzel PHASE). To se získá pomocí bootstrap kondenzátoru C7. Princip funkce je následující. V okamžiku otevření Q4 se uzemní kondenzátor C7 a začne se nabíjet přes diodu D1 z napěťového zdroje na výstupu REGN (6 V). Po uzavření Q4 už není kondenzátor C7 dále uzemněn, zůstává

nabit přibližně na napětí 6 V. Důsledkem je, že napětí na vstupu BTST je nyní o 6 V vyšší, než napětí v uzlu PHASE. Tímto způsobem získáme napětí potřebné k otevření tranzistoru Q3.

Problém nastává v případě střídavy blížící se ke 100 %. Po většinu času je Q4 uzavřen a tím pádem se periodicky nedobíjí C7. Napětí na C7 ale časem klesá, na vině je například samotný svod kondenzátoru i konečná velikost impedance hradla tranzistoru. Pokud napětí klesne pod 4,4 V, je Q3 uzavřen řídicí logikou a Q4 je na krátký čas otevřen, aby došlo k opětovnému dobití kondenzátoru C7. Díky tomu je zajištěna spolehlivá funkce měniče a střída dosahující až 99,5 %. Uvedenému stavu se navíc dá předejít i tím, že ošetříme velikost napětí tak, aby se měnič při své činnosti nemohl přiblížit ke stoprocentní střídě.

Měnič je řízen PWM o frekvenci 750 kHz. Výslednou střidu určují tři regulační smyčky, a to podle velikosti vstupního proudu, nabíjecího proudu a nabíjecího napětí. Velikost vstupního a nabíjecího proudu je odvozena od velikosti napětí na rezistorech RAC a RSR, napětí akumulátoru je snímáno vstupem SRN.



**Obr. 4.2:** Typické zapojení integrovaného obvodu nabíječky BQ24725A

Napětovým děličem R1/R2 lze nastavit přípustnou mez vstupního napětí. Pokud bude napětí mimo požadovaný rozsah, dojde k zastavení nabíjení a odpojení zdroje tranzistory Q1 a Q2. Pokud se vstupní napětí nachází ve správných mezích, je tento stav signalizován výstupem ACOK.

Ochranu proti přepólování zdroje zajišťuje Q6 společně s napětovým děličem R12/R13. Za normálních okolností je tranzistor uzavřen, to je dáno nižším napětím na hradle oproti

source. Pokud je polarita adaptéru obrácena, napěťový dělič vytvoří kladné  $U_{GS}$ . Otevřený tranzistor Q6 vzájemně propojí gate a source tranzistoru Q2 a tím nedovolí jeho otevření. Substrátová dioda tranzistoru Q2 je nyní polarizována závěrně. Na vstupy CM-SRC a ACDRV je potřeba připojit ochranné rezistory, aby se zabránilo zvýšenému průtoku proudu skrz ESD diody uvnitř U1. Pro výběr tranzistoru Q6 je kritická velikost náboje hradla. Ta musí být menší než u tranzistoru Q2, aby se Q6 stihl otevřít dříve. Vybrané tranzistory mají náboj hradla 1,1 nC a 15 nC.

### 4.1.2 Rozložení komponent na DPS

Při návrhu plošného spoje bylo klíčovým požadavkem co nejvíce zmenšit plochu smyčky, kudy protéká vysokofrekvenční proud při činnosti měniče. Na schématu 4.2 je to smyčka tvořená kapacitivy C8-C12 a tranzistory Q3 a Q4. Správným rozložením na DPS zajistíme snížení vyzařování a z toho plynoucí možné rušení dalších obvodů.

Důraz byl kladen především na správné umístění C8-C12, které musí být na stejné vrstvě jako výkonové tranzistory a v jejich těsné blízkosti. Pro spolehlivé buzení tranzistorů by také spoje mezi integrovaným obvodem a hradly měly být co nejkratší.

Vývody od snímacího rezistoru RSR by měly být vedeny spolu, co nejbližší k sobě tak, aby se minimalizovala plocha vzniklé smyčky. Rezistor je umístěn co nejbližší induktoru L1 a na stejné vrstvě jako je IC. Za zmínku stojí také Kelvinův kontakt. To je prostředek, kterým je navázáno elektrické spojení s prvkem, na kterém je potřeba přesně snímat potenciál. Správným provedením se co nejvíce vyloučí odpor kontaktu samotného. Díky tomu je možné snímat protékající proud s vysokou přesností. U integrovaného obvodu by také měl být umístěn odrušovací kondenzátor.

Na DPS je také vidět dostatečné množství prokovených otvorů. Využití jen jediného by nestačilo pro zamýšlený proud 8 A. Také byl raději použit větší počet menších proků než nízký počet velkých proků.

Na uvedeném schématu je možné si povšimnout dvou druhů značek pro označení země. Značka připomínající trojúhelník je použita pro „výkonovou zem“, tedy části obvodu, kudy protéká vysoký proud. Druhá značka je naopak použita pro „analogovou zem“, oproti které jsou měřena integrovaným obvodem napětí. Rozdělení zemí vede k vyšší přesnosti regulace a menšímu zarušení. Země musí být samozřejmě propojeny. Takové propojení bylo podle doporučení provedeno v jediném bodě, a to přímo pod integrovaným obvodem, kde se nachází tzv. powerpad. To je ploška zespodu integrovaného obvodu, která slouží k připojení země a také dobrému odvodu tepla ze součástky. [17]

### 4.1.3 Změny v hardware po testování prvního prototypu

Po otestování první verze nabíječky bylo přistoupeno k odebrání tzv. Power Path. Zjednodušené schéma je uvedeno na obrázku 4.3. Když dochází k dobíjení akumulátoru, pracuje step-down měnič reprezentovaný tranzistory Q1, Q2 a induktorem L1. Tranzistor Q3 je

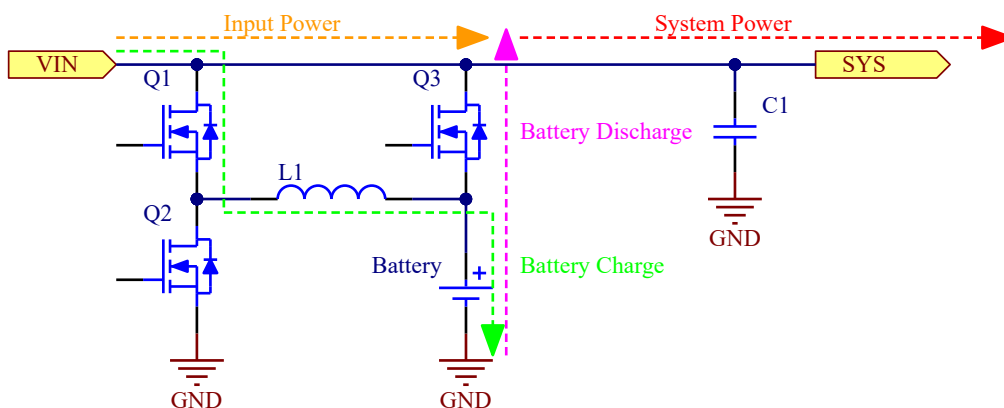


uzavřený. Energie pro napájení obvodů mobilní platformy (SYS) je získávána přímo z DC zdroje připojeného na vstup VIN. Po odpojení DC zdroje je sepnut Q3 a obvody mobilní platformy jsou napájeny z akumulátoru.

Mezi výhody Power Path patří zejména oddělení akumulátoru od zbytku systému při nabíjení. To umožňuje nabíjet plným výkonem měniče, bez toho, aby byla část proudu odebírána elektronikou mobilní platformy. Také může být proces nabíjení řízen pouze podle údajů získaných z obvodu nabíječky, hlavně proto, že je možné přesně určit dobíjecí proud.

Na druhou stranu s sebou tato topologie přináší i nevýhody. Do cesty proudu z akumulátoru je vložen další tranzistor, na kterém vznikají výkonové ztráty. Zvyšují se i požadavky na DC zdroj, který musí být schopný dodat větší proud, jak pro nabíjení, tak zároveň pro elektroniku mobilní platformy. Také dochází ke zvýšení napětí na systémové větvi a to nad úroveň napětí tříčlankového akumulátoru.

Po zvážení výhod a nevýhod byla Power Path odebrána. Proces nabíjení lze řídit podle údajů získaných přímo z BQ40Z80. Funkce přímého napájení elektroniky mobilní platformy z DC zdroje by byla využita minimálně, jelikož se předpokládá, že při nabíjení bude mobilní platforma vypnuta. Navíc je výkon měniče dostatečný na to, aby zároveň napájel elektroniku a dobíjel akumulátor. Díky odebrání Power Path došlo k výraznému zjednodušení schématu i DPS (na obrázku 4.2 je výsledné schéma bez Power Path).



Obr. 4.3: Zjednodušené schéma Power Path

Také byly vyměněny tranzistory Q3 a Q4 (obr. 4.2). Dosavadní typ CSD17308Q3 byl vyměněn za CSD17306Q5A. Docházelo totiž k nadměrnému zahřívání tranzistorů už při proudu 5 A. Nové tranzistory mají lepší parametry a větší pouzdro, díky tomu i vyšší dovolený ztrátový výkon. Z toho důvod byl také kladen větší důraz na design DPS a pod tranzistory byly vytvořeny plošky prokovené na druhou stranu desky. Je tak zajištěn lepší odvod tepla. Druhá verze nabíječky je tedy schopná nabíjet proudem 8 A. To je maximální možný proud při použití integrovaného obvodu BQ24725A v kombinaci s doporučeným snímacím rezistorem o hodnotě 10 mΩ.

Fotografie z testování první verze nabíječky je přiložena v příloze B.1.

#### 4.1.4 Propojení sběrnicí SMBus

System Management Bus (SMBus) je dvou vodičová sběrnice, pomocí které spolu mohou komunikovat různá zařízení. Je založena na principech sběrnice I2C. SMBus je určen především pro úlohy spojené se správou napájení. Díky použití sběrnice je možné posílat pouze po dvou vodičích různé druhy zpráv a měnit tak parametry systému. Bez sběrnice by musely být pokyny předávány za pomoci velkého počtu jednotlivých vodičů. Zároveň to umožní vyrábět integrované obvody s menším počtem pinů, které jsou levnější.[18]

SMBus je sběrnicí typu multimaster. Komunikace je zajištěna pomocí dvou vodičů, hodinový signál nese označení SCL nebo SMBC, datový SDA nebo SMBD. Vysoká úroveň na sběrnicí je zajištěna buď pull-up rezistory, nebo proudovými zdroji. Zařízení jsou připojena ke sběrnicí výstupy typu open collector a mohou na sběrnicí vnutit nízkou úroveň. Zapojení sběrnice umožňuje provádět arbitráž. Pokud by vysílalo více master zařízení najednou, první, které by na sběrnicí chtělo zapsat logickou 1, by ale ze sběrnice četlo logickou 0 udržovanou ostatními zařízeními. Takové zařízení se musí od sběrnice neprodleně odpojit. Arbitráž pokračuje mezi zbylými zařízeními.

Od své první verze z roku 1995 se SMBus neustále vyvíjí. Nejaktuálnější verze 3.0 je z roku 2014. Nové verze jsou kompatibilní se staršími verzemi, i přes mírné změny. Těmi jsou například rozdílné rozsahy napěťových úrovní  $V_{IL}$  a  $V_{IH}$  nebo zavedení dalších protokolů. Přehledná dokumentace je k dispozici na internetových stránkách [smbus.org](http://smbus.org). Při volbě jednotlivých integrovaných obvodů je dobré se na tyto rozdíly zaměřit. BQ24725A i dále zmíněný BMS BQ40Z80 jsou vybaveny SMBus ve verzi 1.1, řídicí mikrokontrolér podporuje SMBus v3.0.

Následuje porovnání hlavních rozdílů mezi velmi rozšířenou a známou sběrnicí I2C vůči sběrnicí SMBus. Z hlediska časování zavádí SMBus požadavek na frekvenci sběrnice v rozsahu 10 - 100 kHz. U sběrnice I2C není minimální frekvence stanovena. Dále SMBus zavádí timeout v případě, kdy by hodinový signál byl v nízké úrovni po dobu delší než 35 ms. Zařízení, které je původcem tohoto stavu, musí po uplynutí dané doby sběrnicí uvolnit. Požadavek timeoutu ale nevylučuje použití zařízení I2C na sběrnicí SMBus. Klade ovšem důraz na vývojáře, aby bylo ošetřeno, že I2C zařízení tento mechanismus nijak nenaruší.

Liší se i využití signálů ACK a NACK (acknowledge/not acknowledge). U zařízení I2C se může stát, že slave zařízení nepotvrdí příjem své adresy, protože právě provádí nějakou úlohu. SMBus vyžaduje, aby zařízení potvrdilo příjem (ACK) své vlastní adresy vždy. Je to totiž mechanismus, kterým se zjišťuje přítomnost odebíratelných zařízení na sběrnicí (akumulátor, dokovací stanice atd.). Signál NACK je u I2C využit také tím způsobem, že pokud je slave zařízení zaneprázdněno a nemůže už přijmout další data, vyšle na sběrnicí právě tento signál. SMBus dále rozšiřuje použití tohoto signálu pro případy, kdy slave obdrží neplatný příkaz nebo data.

Nastavení obvodu nabíječky a řízení procesu nabíjení po sběrnicí SMBus je uvedeno v podkapitole 5.2.

## 4.2 BMS s BQ40Z80

Při výběru integrovaného obvodu, který bude obstarávat battery management, bylo nejprve potřeba si ujasnit některá základní fakta a požadavky. Jak bylo zmíněno dříve, cílem této části obvodového zapojení je monitoring stavu tříčlánekového akumulátoru a jeho balancování. Dále je nutné brát v úvahu i vysokou kapacitu baterie, která je podle zjištěných údajů 108 Ah.

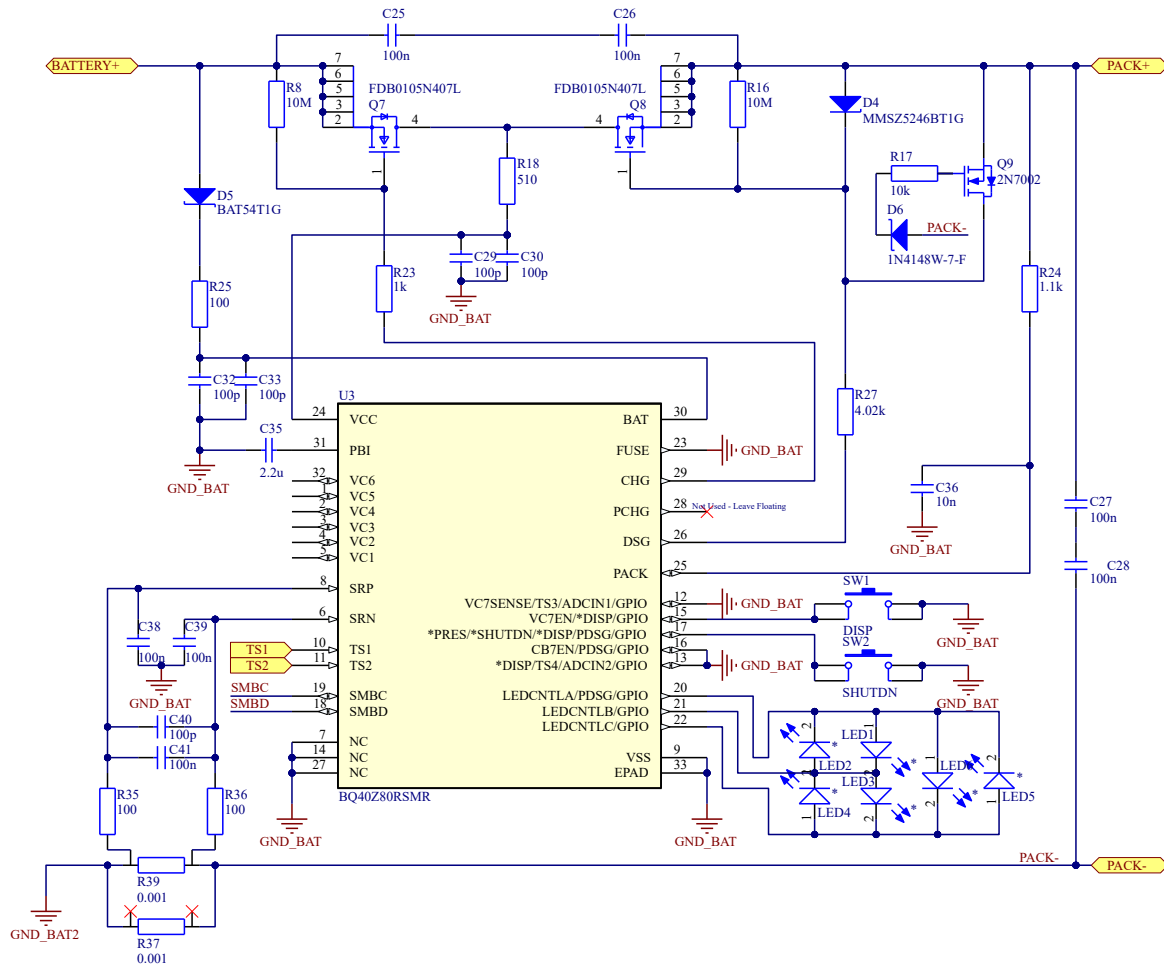
Stejnoseměrné motory určené k pohonu mobilní platformy jsou kapitolou samy pro sebe. Podrobné informace jsou k nalezení v [12, str. 21-24]. Při maximální účinnosti je proud dodávaný do každého motoru podle katalogových údajů až 18 A, ovšem při rozběhu dosahuje špičkový proud velikosti až 120 A pro každý motor. Pro ověření tohoto údaje bylo v uvedené diplomové práci provedeno měření osciloskopem s proudovou sondou. Naměřená proudová špička dosahovala přibližně 60 A a pokles na 50% hodnoty trval 50 ms. Měření probíhalo připojením motoru přes spínač přímo k akumulátoru. Nicméně původní olovený akumulátor byl nahrazen technologií Li-Ion. Navíc je také otázkou, jak velkou mírou se na snížení proudové špičky projeví prvky přidané mezi akumulátor a motory. Řeč není pouze o měřicím rezistoru a tranzistorech, ale také o přechodových odporech konektorů nebo vlivu vodičů.

Pro uvedené hodnoty bylo tedy potřeba správně zvolit i integrovaný obvod. Nejslibnější parametry nabízel právě BQ40Z80. Jedná se o řešení, které poskytuje management a ochranu 2 až 6-ti článkové Li-Ion akumulátoru. Integrovaný obvod zahrnuje i balancování. Nativně podporuje akumulátory až do kapacity 29 Ah. V našem případě, tedy když je kapacita vyšší, je možné využít funkce Current Scaling a použít tak obvod i pro větší akumulátory. BQ40Z80 také obsahuje funkci Impedance Track<sup>TM</sup>, která slouží pro velmi přesný odhad SoC (stupně nabití). Analogové periferie jsou integrovány přímo v čipu. K důležitým informacím, jako je proud, napětí a teplota, lze přistupovat opět po sběrnici SMBus. Navíc má integrovaný obvod několik pinů multifunkčních. Ty mohou sloužit jako analogové vstupy, GPIO, nebo například jako další vstupy pro měření teploty. Obvod také nabízí širokou škálu ochranných mechanismů.[19]

### 4.2.1 Návrh obvodového zapojení

Na obrázku 4.4 je vidět část obvodového zapojení s BQ40Z80. Připojení k článkům akumulátoru (na vývodech VC1-VC6) a obvody pro balancování jsou záměrně vynechány a jejich princip bude uveden později. Kompletní zapojení je k dispozici v příloze A.3. Prozatím předpokládejme, že kladný pól baterie je připojen ke svorce BATTERY+ a záporný je označen jako GND\_BAT2. Kladný pól celého battery packu je označen jako PACK+, záporný pak PACK-.

Nejprve se zaměříme na měřicí rezistor R39. BQ40Z80 je doporučeno používat s měřicími rezistory v rozsahu od 1 do 3 m $\Omega$ . Vzhledem k vysokým proudům a omezené napěťové odolnosti pinů SRN a SRP padla volba na nižší hodnotu 1 m $\Omega$ . Zároveň bylo potřeba do-



**Obr. 4.4:** Zapojení integrovaného obvodu BQ40Z80 (bez obvodů pro pasivní balancování)

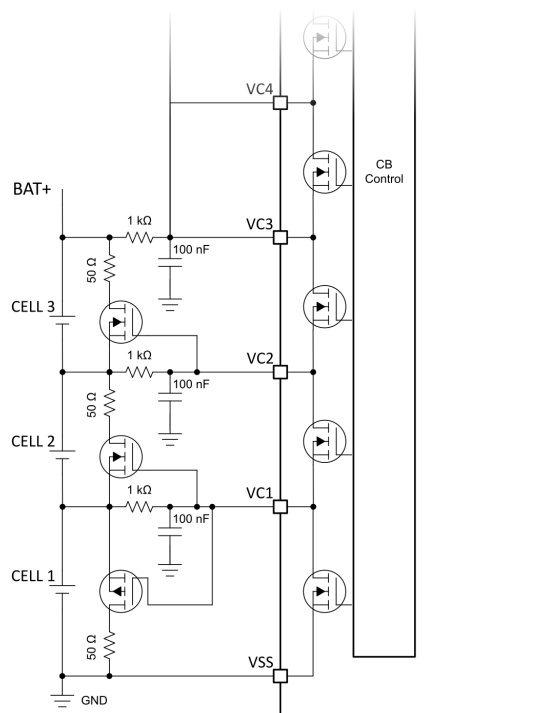
statečně nadimenzovat ztrátový výkon, při pohybu tanku protéká proud přibližně 40 A. Zvolený 9 W rezistor by měl být dostačující, případně je ponechána možnost osadit paralelně další rezistor (R37). Dalším požadavkem na měřicí rezistor byl nízký teplotní součinitel, aby nedocházelo k výrazným změnám odporu v závislosti na teplotě. Pro zajištění ochrany pinů SRN a SRP v případě zkratu byly přidány rezistory R35 a R36, kondenzátory poblíž zmíněných pinů jsou použity především z důvodu filtrace. Z napěťového úbytku na měřicím rezistoru je odvozen protékající proud pro případ vybíjení a nabíjení. Při nabíjení je rozdíl napětí  $U_{SRP} - U_{SRN}$  kladný, při vybíjení naopak. Měření obstarává integrující delta-sigma AD převodník.

Při výběru výkonových tranzistorů byl kladen důraz především na odpor kanálu v sputém stavu a na maximální dovolený proud. Napěťové pumpy integrované v BQ40Z80 budí hradlo napětím o 10 V vyšším než je napětí na source daného tranzistoru. Vybraný tranzistor FDB0105N407L má odpor kanálu 0,8 mΩ při  $I_D = 50$  A a  $U_{GS} = 10$  V. Při teplotě 100°C je dovolený proud drainem až 330 A. V případech, kdy nejsou aktivní obvody pro buzení hradel tranzistorů, je zavření obou tranzistorů zajištěno odpory R8 a R16. Pokud by došlo k přepólování nabíječky na vstupech PACK+ a PACK-, otevře se tranzistor Q9 a zamezí tak otevření tranzistoru Q8 vzájemným zkratováním hradla a source.

Napájení integrovaného obvodu je primárně zajištěno vstupem BAT, sekundárně vstupem VCC. Proti případným krátkodobým výpadkům nebo poklesu hladiny napájecího napětí je doplněn kondenzátor C35 na vstupu PBI (Power Supply Backup Input). Opět je použit kondenzátor v pouzdře 1210, aby se předešlo vlivu napětí na kapacitu. Vstup PACK slouží k detekci nabíječky.

Na schématu jsou umístěna dvě tlačítka. První z nich, SW1, slouží k aktivaci LED displeje. Ten je složen ze šesti LED diod a může sloužit jako ukazatel zbývající kapacity nebo může zobrazovat chybový kód. Druhé tlačítko slouží jako bezpečnostní vypínač. Po jeho stisku dojde k zavření tranzistorů Q7 a Q8. Na vstupy TS1 a TS2 jsou připojeny NTC termistory, které slouží ke sledování teploty článků nebo výkonových MOSFETů. Na pinech SMBC a SMBD je připojen SMBus.

Závěrem této části se dostáváme k obvodům pro balancování. BQ40Z80 umožňuje balancovat interně a externě. V případě interního balancování lze balancovat více článků současně proudem maximálně 10 mA. Toto zapojení je k vidění například v datasheetu [19]. Od velikosti vybíjecího proudu se odvíjí doba potřebná k balancování, zároveň také záleží na míře nevyváženosti jednotlivých článků. Problematika je blíže diskutována například ve zdroji [21]. Protože z uvedeného článku plyne, že proud balancování 10 mA je vhodný spíše pro akumulátory s menší kapacitou, bude potřeba přistoupit k variantě externího balancování.



**Obr. 4.5:** Zapojení pro externí balancování |Převzato z [20] a upraveno|

Připojení obvodů pro externí balancování je uvedeno na obrázku 4.5. Zde vidíme tranzistory uvnitř integrovaného obvodu připojené na piny VSS a VC1-VC6. Vstupy VC4-VC6 jsou v případě 3-člávkové baterie nevyužité a dle doporučení jsou zkratované se vstupem

VC3. Při balancování je připojen externím tranzistorem k danému článku výkonový rezistor. Aby se externí tranzistor otevřel, musí se sepnout interní tranzistor. Například pro třetí článek se otevře interní tranzistor mezi VC2 a VC3, díky tomu začne protékat proud oběma rezistory o hodnotě  $1\text{ k}\Omega$  a vytvoří se tak napěťový dělič. Na gate externího tranzistoru, který je připojen na vstup VC2, je nyní vyšší napětí než na jeho source a díky tomu se tranzistor otevře. Začne tak protékat proud přes rezistor  $50\ \Omega$ . Externí balancování tak umožňuje vyšší proudy, jejichž velikost je daná volbou výkonového rezistoru. Pozornost si zaslouží i první článek, kde je situace mírně odlišná. Místo tranzistoru s kanálem N je použit typ s kanálem P, jehož gate je uzemňován. Source interního tranzistoru není totiž vyveden, ale je uvnitř pouzdra připojen na zem. Nevýhodou externího balancování na obrázku 4.5 je fakt, že při tomto uspořádání není možné balancovat dva sousední články zároveň. V úvahu by mohlo přijít současné balancování ob jeden článek, ovšem tuto možnost BQ40Z80 nepodporuje. Vždy je tak v daný čas balancován pouze jeden článek.

## 4.2.2 Rozložení komponent na DPS

Z hlediska layoutu se setkáváme s problémem, že na jednu desku potřebujeme umístit jednak cesty a komponenty, kterými protéká vysoký proud, ale zároveň také velice citlivé integrované obvody pracující s nízkými úrovněmi napětí. Aby se tyto rozdílné obvody navzájem ovlivňovaly co nejméně, je nejlepším řešením je oddělit. Do jedné části DPS jsou umístěny prvky smyčky, kudy protéká vysoký proud. To jsou především tranzistory Q7 a Q8, snímací rezistor, cesty na plošném spoji sloužící k jejich vzájemnému propojení a konektory. Druhá část desky zahrnuje především integrovaný obvod a zbylé pasivní součástky.

Pozornost byla věnována i paralelní kombinaci rezistorů pro snímání proudu. Ty by měly být umístěny tak, aby se mezi ně rovnoměrně rozložil protékající proud. Toho lze dosáhnout vhodným tvarem přívodních cest. Kelvinův kontakt je v tomto případě vyveden pouze od jednoho rezistoru [22]. Komponenty filtru (R35, R36, C38-C41) je dobré umístit co nejbližší k integrovanému obvodu a zároveň kolem nich rozlít „analogovou“ zem (GND\_BAT). Cesty jsou vedeny blízko u sebe, aby nevznikala smyčka se zbytečně velkou plochou. Rozdělení zemí vychází ze stejného principu, jako u DPS nabíječky s BQ24725A. Obě země jsou opět propojeny v jediném bodě.

Kondenzátory C25 a C26 slouží jako ochranný prostředek výkonových tranzistorů proti ESD. Použití dvou kondenzátorů v sérii zajišťuje vyšší spolehlivost v případech, kdy by u jednoho z nich došlo ke zkratu. Přívodní cesty k těmto kondenzátorům jsou záměrně širší, aby se snížila jejich impedance.

Osazený prototyp desky je k vidění v příloze B.2.

## 4.3 Řídicí mikrokontrolér STM32L476RG

Jako řídicí mikrokontrolér byl zvolen STM32L476RG. Jedná se o mikrokontrolér s velice nízkou spotřebou, který obsahuje komunikační rozhraní jak pro práci s SMBus, tak pro komunikaci po sběrnici CAN. V úvodní fázi návrhu byl použit hotový vývojový kit Nucleo L476RG, díky kterému nebylo nutné se zabývat návrhem další DPS s mikrokontrolérem samotným. Bylo tak možné více času věnovat návrhu obvodů pro nabíjení a battery management. Ve finální verzi je MCU osazen přímo na plošný spoj společně se zbývajícími komponenty celého navrženého řešení.

Zapojení MCU na hotovém modulu správy napájení vychází ve velké míře právě ze zapojení vývojového kitu Nucleo. Pomineme-li programátor ST-Link, jsou součástí vývojového kitu pouze komponenty nutné pro chod samotného MCU. Můžeme zmínit například krystalový rezonátor, regulátor napětí či blokovací kondenzátory. Schéma vývojového kitu, ze kterého bylo čerpáno, je k dispozici ve zdroji [23].

Princip a funkce zbývajících obvodů, jako je step-down měnič pro zajištění napájení mikrokontroléru nebo CAN transceiver, byly rozebrány v rámci mé bakalářské práce [24] a nebudu se proto jimi dále detailněji zabývat.

### 4.3.1 Programování s využitím ST-Link

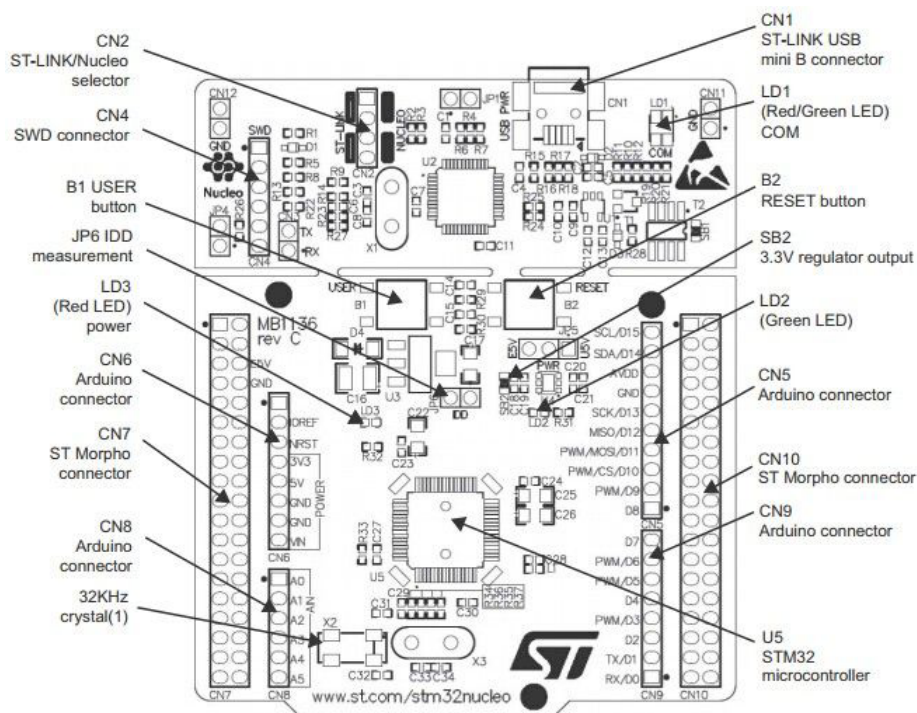
Myšlenka je taková, že pro naprogramování osazeného mikrokontroléru se využije ST-Link, který je součástí každého vývojového kitu Nucleo. K tomu účelu je potřeba vyvést některé signály MCU na header, díky kterému bude možné jej s ST-Linkem propojit. Také je potřeba mírně upravit zapojení ST-Linku.

Signál	Význam	Pin (CN4 - Nucleo)	Pin (SWD - Modul)
VDD_TARGET	VDD cílového MCU	1	1
SWCLK	Hodinový signál SWD	2	2
GND	Zem	3	3
SWDIO	SWD Data	4	4
NRST	RESET cílového MCU	5	5
SWO	Rezervováno	6	6

**Tab. 4.1:** Propojení a význam signálů programátoru a modulu napájení

Na obrázku 4.6 můžeme vidět, že ST-Link se nachází v horní části. Aby bylo možné programovat a ladit externí mikrokontrolér, je nejprve potřeba odebrat oba jumpery z konektoru CN2. Tím se rozpojí spojení s MCU, který je přímo součástí desky. Dále se připojí externí mikrokontrolér rozhraním SWD. Princip propojení je znázorněn v tabulce 4.1. První sloupec uvádí název signálu, druhý jeho funkci, ve třetím nalezneme číslo pinu na konektoru CN4 vývojového kitu Nucleo (pin 1 je označen tečkou na DPS) a v posledním sloupci je číslo odpovídajícího pinu konektoru SWD na modulu správy napájení (názvy

signálů jsou vytištěny u konektoru). Propojení signálů VDD\_TARGET, NRST a SWO není nezbytně nutné.



Obr. 4.6: Rozložení komponent vývojového kitu Nucleo [Převzato z [25]]

Je samozřejmě možné využít i převodník UART - USB, který je součástí ST-Linku. Nejprve je však potřeba vyřadit z činnosti procesor, který je součástí vývojového kitu. To je možné několika způsoby, například uzemněním vývodu NRST na konektoru CN6 nebo přerušením napájecí větve (odebrání jumperů z konektorů JP6, případně JP5). V rámci ST-Linku je UART k dispozici na konektoru CN3 (piny RX a TX), v případě modulu správy napájení je to konektor UART opět s piny RX a TX. Vzájemné propojení se provede tak, že se výstup TX ST-Linku připojí na vstup RX modulu správy napájení. Shodně i pro druhý směr komunikace. Země obou zařízení musí být propojené. Detailnější popis úprav lze nalézt v [26].

Rozmístění konektorů na modulu správy napájení lze nalézt v příloze E.1.



# 5

## Software modulu napájení

Tato kapitola pojednává o vytvořeném software pro mikrokontrolér STM32L476RG. Kód programu je psán v jazyce C ve vývojovém prostředí Atollic TrueSTUDIO. Kód pro inicializaci periférií byl vygenerován za pomoci programu STM32CubeMX a pro obsluhu periférií jsou z velké části využity HAL knihovny. Informace nutné pro naprogramování byly čerpány především z referenční příručky [27] a dále z datasheetu [28].

Postupně jsou probrány protokoly a způsob komunikace po sběrnici SMBus. Na ně přímo navazuje podkapitola věnovaná obsluze integrovaného obvodu BQ24725A. Obvod pro battery management BQ40Z80 je samostatně funkčním celkem. Před uvedením do provozu však vyžaduje jisté úvodní nastavení.

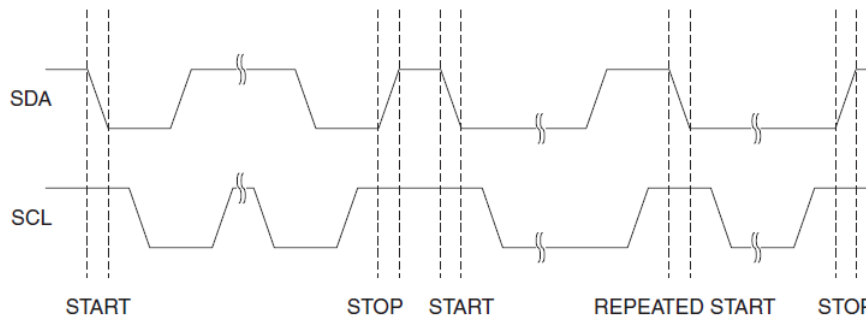
Poté je text zaměřen na samotný program mikrokontroléru. Ten se stará o řízení procesu nabíjení a o obsluhu sběrnic CAN a SMBus.

V závěrečné fázi kapitoly je rozebrán komunikační protokol po sběrnici CAN, sloužící k předávání dat mezi modulem správy napájení a řídicím počítačem.

### 5.1 Sběrnice SMBus

#### 5.1.1 Obecný popis

Způsob přenosu dat po sběrnici SMBus se podobá známé sběrnici I2C. Přenos zahajuje master vygenerováním sekvence start následovanou 7-bitovou adresou slave zařízení. 8 bit v pořadí určuje směr přenosu, 0 znamená WRITE (přenos z master do slave), 1 znamená READ (přenos ze slave do master). Přenos je vždy ukončen sekvencí stop. Některé protokoly SMBus vyžadují, aby master generoval sekvenci repeated start, která je hned následována adresou slave zařízení. Rozdíl v průběhu sekvencí na datovém a hodinovém vodiči je dobře viditelný na obrázku 5.1. SMBus také umožňuje 10-bitové adresování, ale žádný z použitých integrovaných obvodů jej nevyžaduje, proto se touto variantou nebudu zabývat. Pokud je zařízení přítomné na sběrnici, musí to vždy po přijetí své adresy potvrdit vysláním bitu ACK.



**Obr. 5.1:** Rozdíl mezi sekvencemi start, stop a repeated start [Převzato z [29]]

Podle funkce se rozlišuje mezi třemi typy zařízení SMBus. Jsou to slave, master a host. Slave je zařízení, které pouze přijímá povely a odpovídá na ně. Master rozesílá povely a zároveň se stará o generování hodinových impulzů a ukončení přenosu. Host je specializovaný master, který zprostředkovává spojení s nadřazeným systémem. V systému může být nanejvýš jeden host. Zařízení ale může být navrženo i tak, že po většinu stavu je master a ve speciálních případech se chová jako slave.

SMBus ve verzi 1.1 zahrnuje následující protokoly: Quick Command, Send Byte, Receive Byte, Write Byte/Word, Read Byte/Word, Process, Block Read a Block Write. Většina zařízení ale používá pouze některé z nich. Například použitý BQ24725A používá pouze Read Word a Write Word. BQ40Z80 podporuje širší škálu protokolů, pro většinu komunikace ale využívá Block Read a Block Write. Z toho důvodu budou právě tyto protokoly dále popsány.

### 5.1.2 Protokol Write Word

Přenos je zahájen vysláním sekvence start (S). Následuje 7-bitová adresa a bit R nebo W. Zde bych poznamenal, že adresa je v dokumentaci uváděna jako 8-bitová včetně bitu R/W, což může přinášet nejasnosti. Dále slave potvrdí svou přítomnost bitem ACK. Následuje bajt obsahující command (příkaz). Slave potvrzuje příjem každého bajtu. Následuje nižší datový bajt a nakonec vyšší datový bajt. Přenos končí sekvencí stop (P). Jak je vidět lépe z obrázku 5.2, přenos každého bajtu začíná nejvýznamnějším bitem (MSB). Bílou barvou jsou označena pole, kdy je přenos směrem master-slave. Šedá pole jsou přenášena směrem opačným.

S	SLAVE ADDRESS	W	ACK	COMMAND BYTE	ACK	LOW DATA BYTE	ACK	HIGH DATA BYTE	ACK	P
	7 BITS	1b	1b	8 BITS	1b	8 BITS	1b	8 BITS	1b	
	MSB LSB	0	0	MSB LSB	0	MSB LSB	0	MSB LSB	0	

**Obr. 5.2:** Formát rámce Write Word [Převzato z [17]]

### 5.1.3 Protokol Read Word

Čtení dat je o něco více komplikované než zápis dat. Nejdříve musí master zapsat command. Část rámce pro čtení je tedy podobná tomu pro zápis. Po bajtu obsahujícím command následuje bit ACK a dále sekvence repeated start. Následuje opět adresa slave a bit read. Slave navrací 2 datové bajty a konec čtení je ohlášen bitem NACK. Celý přenos opět končí sekvencí stop.

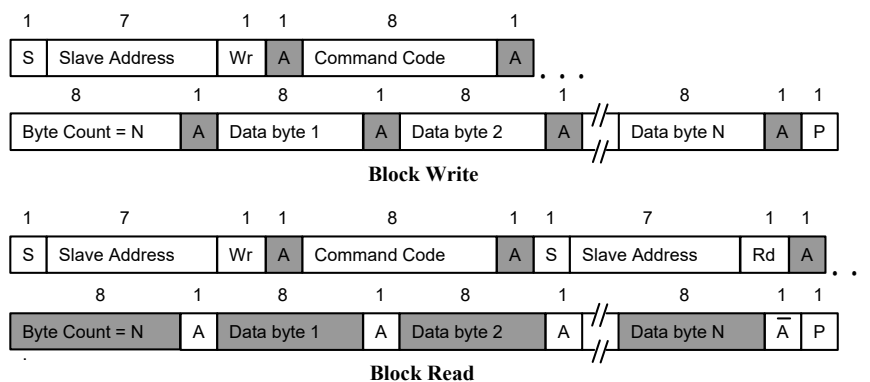
S	SLAVE ADDRESS	W	ACK	COMMAND BYTE	ACK	S	SLAVE ADDRESS	R	ACK	LOW DATA BYTE	ACK	HIGH DATA BYTE	NACK	P
	7 BITS	1b	1b	8 BITS	1b		7 BITS	1b	1b	8 BITS	1b	8 BITS	1b	
	MSB LSB	0	0	MSB LSB	0		MSB LSB	1	0	MSB LSB	0	MSB LSB	1	

Obr. 5.3: Formát rámce Read Word |Převzato z [17]|

### 5.1.4 Protokol Write Block a Read Block

Protokol Write Block vychází z protokolu Write Word. Hlavním rozdílem ale je, že po bajtu command následuje speciální bajt, ve kterém je uvedeno, kolik bude ještě dále přeneseno datových bajtů. Na obrázku 5.4 nahoře je to bajt s označením byte count. Dále je přeneseno N datových bajtů a poté přenos končí.

Rámec Read Block je v dolní části obrázku 5.4. Opět je zde jistá podobnost s protokolem Read Word. Byte count má stejný význam. V dokumentaci SMBus [18] je uvedeno, že počet přenesených datových bajtů je v rozsahu 1 až 32. Ovšem při práci s BQ40Z80 bylo zjištěno, že při čtení z paměti flash je počet bajtů, které BQ40Z80 vrací, vyšší. Podrobněji je toto chování rozvedeno v 5.3.2.



Obr. 5.4: Formáty rámců Write Block a Read Block |Převzato z [18]|

## 5.2 Řízení integrovaného obvodu BQ24725A

BQ24725A se na sběrnici SMBus chová pouze jako slave s adresou 0x12. Frekvence hodinového signálu byla nastavena na 100 kHz. Jak už bylo zmíněno dříve, tento integrovaný

obvod používá pouze protokoly Write Word a Read Word. Díky tomu je komunikace celkem jednoduchá a obvod tak posloužil pro odladění kódu, který zajišťuje přenos po sběrnici. Zpočátku představovalo problém vytvoření sekvence repeated start. Po důkladnějším prostudování dokumentace a zobrazení průběhu na osciloskopu se podařilo nedostatek vyřešit.

Za účelem co nejsnazší komunikace byly vytvořeny dvě funkce. První z nich je funkce `SMBus_Write_Word`, která má tři vstupní argumenty. Jsou to adresa zařízení, 8-bitový command a 16-bitová data. U obvodu BQ24725A lze command chápat jako adresu registru, do kterého se buď zapisuje nebo se z něj čte. Druhou vytvořenou funkcí je `SMBus_Read_Word`. Tato funkce zajišťuje čtení ze slave zařízení, vstupní argumenty jsou nyní pouze adresa a command. Návratovou hodnotou jsou přijatá 16-bitová data.

Celkem má integrovaný obvod 6 16-bitových registrů. Dva z nich, označené `ManufacturerID` a `DeviceID` jsou pouze pro čtení. Používají se k identifikaci obvodu a posloužily zejména při ladění kódu. O dost zajímavější je čtveřice zbylých registrů popsána níže. Tyto registry se při každém přerušení napájení vrátí do výchozí hodnoty a je potřeba je správně nastavit.

- `ChargeOption` – slouží k nastavení různých parametrů integrovaného obvodu, jako je frekvence PWM nebo Watchdog timer. Nejdůležitější je však bit, kterým se dá zakázat či povolit dobíjení.
- `ChargeCurrent` – nastavení dobíjecího proudu. Výchozí stav = 0 mA.
- `ChargeVoltage` – nastavení dobíjecího napětí. Výchozí stav = 0 mV.
- `InputCurrent` – nastavení velikosti vstupního proudu. Výchozí stav = 4096 mA.

K zahájení dobíjení stačí zapsat do registrů pro nabíjecí napětí a proud platnou hodnotu. Pokud poté nabíjení nezačne, nejsou splněny ostatní podmínky, jako je například velikost napětí na vstupu. Aby bylo možné z DC adaptéru odebírat proud větší než 4096 mA, musí se vhodně přepsat i obsah registru `InputCurrent`. Ve výchozím režimu je aktivní Watchdog timer a proto se musí každých 175 vteřin znovu zapsat do registru `ChargeCurrent` nebo `ChargeVoltage`, jinak bude dobíjení přerušeno.[17]

## 5.3 Integrovaný obvod BQ40Z80

### 5.3.1 Úvodní nastavení BQ40Z80

Po osazení se integrovaný obvod BQ40Z80 musí správně nakonfigurovat, jelikož se jedná o velice univerzální zařízení s rozmanitými funkcemi. Mírnou inspiraci lze čerpat z manuálu k vývojovému kitu BQ40Z80EVM [30], jehož součástí je právě obvod BQ40Z80. Tento

manuál je však velmi strohý a spíše se zaměřuje na obsluhu softwaru Battery Management Studio (dále bqStudio). Převážná většina informací byla tedy získána z obsáhlého referenčního manuálu [20].

V další části textu bude popsáno, jaké kroky vedly k uvedení BQ40Z80 do provozuschopného stavu. Jedním důvodem je, že takovýto postup ve stručné verzi se nikde nepodařilo dohledat. Druhým důvodem je fakt, že pro využití plného potenciálu tohoto obvodu a získání informací z něj bude v budoucnu potřeba upravit řídicí aplikaci mobilní platformy a je tak nutná znalost základního nastavení obvodu.

Ze všeho nejdříve je potřeba se přesvědčit, že je integrovaný obvod v chodu. Začneme připojením balančního konektoru následovaného hlavním konektorem akumulátoru. Pro první „probuzení“ BQ40Z80 se musí přivést napětí nejen na vstupy VCC a BAT, ale i na vstup PACK. Nejjednodušší variantou je krátkodobé připojení nabíječky. Alternativně lze přemostit tranzistory Q7 a Q8 rezistorem o hodnotě 10 k $\Omega$ . To má za následek přivedení napětí z akumulátoru na vstup PACK. Výsledkem je spuštění obvodu, které lze ověřit proměřením napětí na kondenzátoru C35 (pin PBI). Napětí na kondenzátoru by mělo být přibližně shodné s napětím celého akumulátoru. Od tohoto okamžiku je integrovaný obvod v chodu. Nyní lze provést jednoduchý test komunikace. Na SMBus vyšleme adresu BQ40Z80 a sledujeme, jestli obvod potvrdí svou přítomnost na sběrnici. Pokud by došlo k úplnému odpojení BQ40Z80 od akumulátoru a následně opětovnému připojení, je potřeba uvedenou sekvenci zopakovat, jinak nebude obvod reagovat.

Úvodní nastavení se provádí zápisem do paměti flash BQ40Z80. Výhodné je použít software bqStudio. Použití bqStudia je však podmíněno propojením integrovaného obvodu s počítačem pomocí SMBus-USB převodníku EV2400. Nicméně bqStudio je nutné pouze pro úvodní nastavení obvodu, aktualizaci firmware a tabulek impedancí. Zbylé úkony už jsou možné i bez zmíněného softwaru. Náhled na některé registry v programu bqStudio je v příloze C.1.

Prvním krokem bylo nahrání aktualizace firmware BQ40Z80, který je dostupný ze stránek Texas Instruments. Dále byly naprogramovány vhodné hodnoty do tabulek impedancí. Ty jsou závislé na typu a chemickém složení použitých článků. Souhrnně jsou označeny jako ChemID a odpovídající kód ChemID pro články Panasonic CGR18650CH je 0x242. Tabulky impedancí jsou používány algoritmem například pro odhad stupně nabití akumulátoru. Následující kroky nastavení jsou už možné bez převodníku EV2400.

Protože BQ40Z80 nativně podporuje pouze akumulátory do kapacity 29 Ah a proud o maximální velikosti přibližně 32 A, musí se nastavit tzv. Scale Factor. To je číslo, kterým jsou veškeré hodnoty týkající se proudu či kapacity vyděleny. Důvodem použití je především omezená velikost registrů a paměti integrovaného obvodu. Scale Factor byl vyčíslen na hodnotu 4. Při používání integrovaného obvodu je toto mít potřeba na paměti. Tedy například pokud budeme odebírat z akumulátoru proud 20 A, v registru proudu bude hodnota 5 A.

Tři multifunkční piny byly nastaveny na funkci LED displeje. Díky tomu se po stisku

tlačítka DISP zobrazí stav nabití na šesti LED diodách. Proud diodami byl nastaven na nižší hodnotu, jelikož při plném vybití LED displeje docházelo k zahřívání integrovaného obvodu. K pinu 17 je připojené tlačítko SHUTDN, které má funkci bezpečnostního vypínače. Pokud je stisknuto po dobu 1 vteřiny, dojde k rozepnutí tranzistorů Q7 a Q8 (obr. 4.4) a tím odpojení akumulátoru od zbytku systému. Připojení akumulátoru je možné opětovným podržením tlačítka.

Kapitola 6 referenčního manuálu [20] se zabývá režimem snížené spotřeby. Pokud přes snímací rezistor neprotéká proud vyšší jak nastavená mez (40 mA), je obvod v režimu snížené spotřeby a je otevřen pouze tranzistor Q8. Tranzistorem Q7 protéká proud díky substrátové diodě. Po překročení zmíněné hranice obvod přechází do aktivního režimu a otevírá se Q7. Dále jsou zde uvedeny informace spojené s funkcí Scale Factor a nastavením tlačítka SHUTDN. Odblokování jednotlivých funkcí, jako je například zmíněný LED displej nebo ovládání tranzistorů se musí nastavit v registru Manufacturing Status, což nebylo na první pohled z manuálu zřejmé.

Funkce Gauging slouží pro odhadování stavu nabití. Ten je zjišťován jednak z napětí v nezátíženém stavu a také integrací náboje v průběhu vybíjení/nabíjení. Správná funkce vyžaduje nastavení následujících hodnot. Opět byl na hodnoty proudů a kapacit uplatněn Scale Factor. Za zmínku také stojí jednotka kapacity cWh (centiwatthodina, 1 cWh=0,01 Wh). Hodnota celkové kapacity byla záměrně zmenšena na 25000 mAh, i když měla být nastavena na 27000 mAh – viz dále.

- Nastavení počtu článků akumulátoru – Cell Count 3
- Kapacita a napětí – Design capacity 25000 mAh/27000 cWh, Voltage 10800 mV
- Proud při ukončení dobíjení – Charge term taper current 1000 mA
- Mez vybíjecího proudu – Dsg Current Threshold 100 mA
- Mez nabíjecího proudu – Chg Current Threshold 50 mA
- Mez přechodu do režimu snížené spotřeby – Quit Current 10 mA
- Napětí pro ukončení vybíjení – Term voltage 9000 mV

Kalibrace je důležitou součástí procesu nastavení. Kompletní postup je uveden v aplikační poznámce [31]. Ve zkratce se jedná o přivedení známých proudů a napětí, podle kterých se poté kalibruje BQ40Z80. Provedení kalibrace je jednoduché s použitím bqStudia, kde jsou připraveny rutiny pro kalibraci a uživatel pouze zadá velikost známé hodnoty. Byla provedena kalibrace proudu a napětí článků. Pro kalibraci teploty nebyly k dispozici vhodné nástroje a zobrazované hodnoty odpovídaly předpokladům.

Poté je možné přistoupit k provedení Learning Cycle. Tedy procesu, kdy se vybitá baterie musí nabít a opět vybit definovaným proudem a v průběhu toho dochází k aktualizaci hodnot v tabulkách impedancí a celkové kapacity. Nutno podotknout, že celý cyklus

je velice časově náročný u akumulátoru s tak vysokou kapacitou. Nabíjení proudem 5 A trvalo přibližně 24 hodin a vybití proudem 16 A asi 6 hodin. Vybití by mělo probíhat konstantním proudem. Bylo proto nutné použít elektronickou zátěž v režimu konstantního proudu. Po vybití je navíc nutné počkat přibližně 5 hodin na ustálení napětí článků (změna napětí článku musí být menší než  $4\mu\text{V/s}$ ). Podobně je tomu i po nabití, kdy ustálení trvá kratší dobu, přibližně 2 hodiny. Celkem trval jeden cyklus zhruba 37 hodin. Bohužel po prvním cyklu nedošlo ke změně proměnné LStatus, kterou se řídí stavový automat učení. Celý cyklus byl proto zopakován, ovšem se sníženou hodnotou kapacity akumulátoru na 25000 mAh. Po provedení této změny již cyklus proběhl úspěšně a řídicí proměnná LStatus se změnila na hodnotu 0x06. Uvedený pokles kapacity o 2000 mAh (reálně 8 Ah) je zřejmě způsoben stárnutím článků. Naměřená kapacita je 24234 mAh. Celý proces učení je zdokumentován v [32].

Následovalo zprovoznění funkce balancování. Algoritmus balancování funguje tak, že podle stupně vybití jednotlivých článků vypočte dobu, po kterou mají být sepnuté spínače připojující ke článkům paralelní rezistory (obr. 4.5). Vypočtený čas je odvozen od velikosti připojeného rezistoru. Ta není ve flash paměti BQ40Z80 vyjádřena přímo, ale jako doba v sekundách, za kterou je ze článku odebrána kapacita 1 mAh. Algoritmus balancování je provázán s funkcí Gauging. Je proto požadováno, aby byl úspěšně dokončen Learning Cycle, v tomto případě dokonce dvakrát po sobě a hodnota proměnné LStatus byla 0x0E. Proto bylo opět přistoupeno k úplnému vybití a nabití akumulátoru. Balancování probíhá při nabíjení nebo v režimu spánku. Úvodní balancování trvalo přibližně 12 hodin, kdy nejvyšší dva články byly vybity, každý po dobu 6 hodin.

Posledním krokem bylo nastavení ochrany. Ochrany se aktivují ve čtyřech registrech Enabled Protections A/B/C/D. Výjimku tvoří 3 hardwarové ochrany, které nelze deaktivovat a jsou odvozené od velikosti napětí na snímacím rezistoru. Nejucelenější přehled ochrany je součástí referenčního manuálu [20], kde jsou přesně definované akce, které nastanou v případě překročení prahu jednotlivých ochrany. Přehled nastavených ochrany je uveden v kapitole 6 v tabulce 6.1.

Po úplném nastavení byla vytvořena s pomocí programu bqStudio kompletní záloha firmware, včetně aktualizovaných tabulek impedancí. Vzniklý soubor má příponu .srec. Tento soubor se v literatuře Texas Instruments označuje jako „Golden File“ a v případě sériové výroby by byl nahrán do vyráběných battery packů. Díky tomu navíc není nutné na každém kusu ze série provádět zdlouhavý Learning Cycle. Soubor je k dispozici na přiloženém CD.

### 5.3.2 Komunikace s BQ40Z80

BQ40Z80 je na sběrnici SMBus připojen jako slave s adresou 0x16. Frekvence hodinového signálu na sběrnici je 100 kHz. Tato hodnota je kompatibilní s oběma připojenými integrovanými obvody, tedy jak s BQ40Z80 tak s nabíječkou BQ24725A.

Komunikace s BQ40Z80 je o něco složitější než s dříve uvedeným obvodem nabíječky.

K protokolům Write Word a Read Word přidává navíc ještě protokoly Read Block a Write Block. Ty umožňují přenos většího počtu bajtů. Při ladění komunikace byla zaznamenána jistá nesrovnalost mezi specifikací SMBus [18] a chováním obvodu BQ40Z80. Ve specifikaci SMBus je stanoveno, že protokolem Read Block/Write Block lze přenést maximálně 32 bajtů, pole Byte Count tedy nabývá rozsahu 1 až 32. Ovšem v některých případech byl Byte Count 34 a z BQ40Z80 muselo být celkem vyčteno 34 bajtů. Toto chování bylo zaznamenáno například při přístupu do paměti flash, kdy součástí navracených hodnot byla v prvních dvou bajtech i adresa bloku paměti. Nicméně zmíněné chování je v souladu s referenčním manuálem k BQ40Z80 a z hlediska kódu mikrokontroléru byl proto pouze navýšen limit pro počet bajtů přenášených protokoly typu block.

Popis všech příkazů je v kapitole 18 referenčního manuálu [20]. Zvláštností je použití příkazu 0x44 – ManufacturerBlockAccess. Tento příkaz umožňuje přístup do paměti flash nebo využití různých ladících funkcí. Jako příklad je uveden způsob přečtení ChemID. V manuálu lze dohledat, že ChemID je dostupné při zadání příkazu 0x0006. Nejprve je potřeba do BQ40Z80 zapsat a následně vyčíst. Rámec Write Block tedy vytvoříme podle obrázku 5.5 nahoře. V poli command je hodnota 0x44 z důvodu přístupu do ManufacturerBlockAccess. Následuje pole Byte Count s hodnotou 2, budou zaslány dva bajty. Konečně příkaz pro ChemID v datových bajtech 1 a 2 (little endian), tedy 0x06 a 0x00. Po odeslání této sekvence je možné přistoupit ke čtení dat. S využitím protokolu Read Block a commandu 0x44 jsou navraceny 4 bajty. První dva obsahují příkaz, další dva hodnotu ChemID. Opět little endian. Výsledné ChemID je tedy 0x0242.

Write block										Slave to Master					
S	Slave Address	Wr	A	Command	A	Byte Count	N	A	Data Byte 1	A	Data Byte 2	A	P	Master to Slave	
	0x16	0		0x44		0x02			0x06		0x00				

Read block																						
S	Slave Address	Wr	A	Command	A	S	Slave Address	Rd	A	Byte Count	N	A	DB1	A	DB2	A	DB3	A	DB4	NACK	P	
	0x16	0		0x44			0x16	1			4		0x06		0x00		0x42		0x02			

**Obr. 5.5:** Rámce pro vyčtení ChemID s využitím přístupu přes ManufacturerBlockAccess

Obdobným způsobem se přistupuje i do paměti flash, kdy na místě prvních dvou datových bajtů je adresa v paměti. Pokud se do paměti zapisuje, je možné poslat 1 až 32 bajtů dat. V případě čtení je vrácena vždy adresa (2 bajty) a následuje 32 bajtů dat.

Pro běžnou obsluhu a získání dat z BQ40Z80 však postačí přístup přímo pomocí určitého příkazu. Například Read Block obsahující command 0x21, DeviceName, navrací řetězec sedmi znaků „BQ40Z80“.

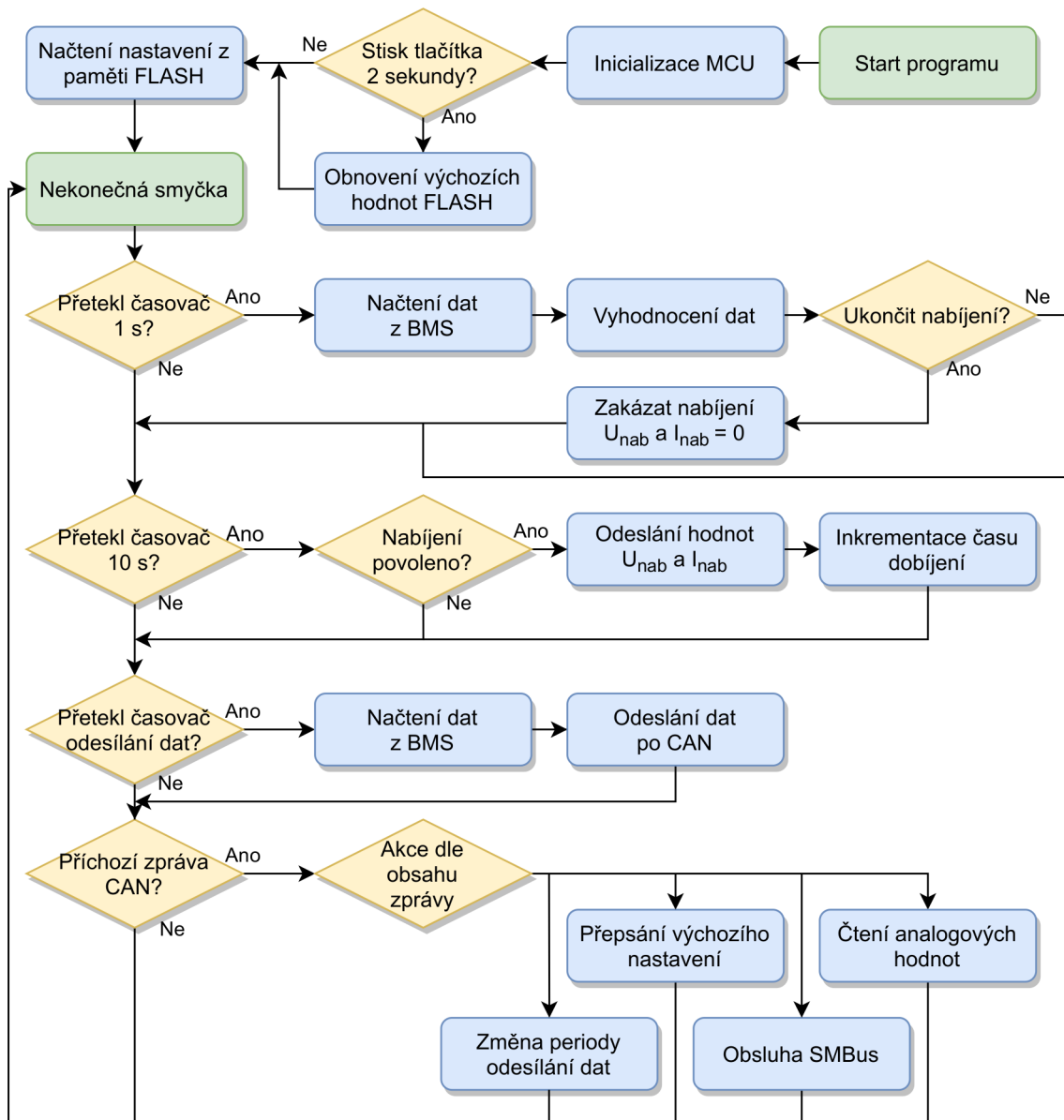
Dříve uvedené funkce SMBus\_Write\_Word a SMBus\_Read\_Word lze samozřejmě použít i pro komunikaci s BQ40Z80. Navíc z nich vycházejí další dvě funkce SMBus\_Write\_Block a SMBus\_Read\_Block. Funkce SMBus\_Write\_Block má 4 vstupní parametry. Jimi jsou adresa zařízení, 8-bitový command, pointer na pole bajtů, kde jsou umístěna data určená k zápisu a nakonec počet bajtů k přenosu. Funkce SMBus\_Read\_Block má tři vstupní parametry – adresu, command a pointer na pole, do kterého se budou přijatá data ukládat. Funkce



navrací počet bajtů, které byly přečteny. Za pomoci těchto funkcí je obsluhována komunikace se všemi připojenými zařízeními na sběrnici SMBus. Z uvedených funkcí vychází dále i část protokolu použitého pro komunikaci po sběrnici CAN – podkapitola 5.5.

## 5.4 Program mikrokontroléru

Program mikrokontroléru STM32L476RG byl vytvořen podle vývojového diagramu 5.6.



Obr. 5.6: Vývojový diagram programu mikrokontroléru

Po inicializaci dochází k přečtení úseku paměti flash, kde je uloženo nastavení pro integrovaný obvod BQ24725A. Tento obvod totiž nemá paměť a po výpadku napájení se vrací vždy do výchozího stavu definovaného v katalogovém listu [17]. Podle hodnot v paměti flash je následně nastaven BQ24725A. Aby bylo možné měnit parametry dobíjení,

především napětí a proud, je možné z řídicího počítače zapisovat do zmíněného úseku paměti flash. V případě, že by byly do flash řídicím počítačem zapsány nevhodné hodnoty, lze obsah flash resetovat podržením tlačítka USER po dobu dvě vteřiny ihned po spuštění napájení modulu. Úspěšné provedení resetu hodnot je indikováno trojitým probliknutím LED. Hodnoty jsou uloženy v paměti flash proto, aby při dobíjení nemusel běžet řídicí počítač. Dobíjení je tak zcela pod kontrolou modulu správy napájení i při vypnutém hlavním spínači (celý systém mobilní platformy neaktivní).

Program každou sekundu kontroluje průběh nabíjení. To je zajištěno čtením dat z integrovaného obvodu BQ40Z80. S výhodou bylo využito bitů z registru batterystatus, které informují o stavu akumulátoru. Především však bit TCA (Terminate Charge Alarm) a FC (Fully Charged). Podle těchto bitů je řízeno zahájení a ukončení nabíjení. Navíc BQ40Z80 v případě detekce plného nabití automaticky uzavírá dobíjecí tranzistor Q7.

Každých 10 sekund jsou odeslány hodnoty nabíjecího proudu a napětí do BQ24725A. Ten totiž obsahuje funkci watchdog, a pokud by nedocházelo k periodickému přepisování dat, automaticky by přestal dobíjet. Také byla implementována funkce časovače dobíjení. Pokud by doba dobíjení překročila 24 hodin, bude dobíjení ukončeno. Tato funkce je i součástí ochran BQ40Z80, ale nelze ji nastavit na tak dlouhý časový interval.

Pokud uplyne nastavená časová perioda, je po sběrnici CAN automaticky odeslán rámec obsahující vybraná data o akumulátoru. Těmi je součet napětí všech článků, proud akumulátoru a relativní stav nabití. Dobu, po které je rámec automaticky odeslán, lze nastavit konfigurační zprávou. Je také možné odesílání tohoto informačního rámce zcela zastavit. Nastavení opět zůstává uloženo ve flash paměti mikrokontroléru.

Pokud je aktivní příznak pro příchozí zprávu CAN, je zahájeno obslužení požadavku. Podle identifikátoru rámce je zpráva zařazena a následně je vykonána odpovídající akce. Kompletní komunikační protokol je popsán v následující podkapitole 5.5.

## 5.5 Komunikační protokol po sběrnici CAN

V této části práce je popsán protokol použitý pro komunikaci mezi řídicím počítačem a modulem správy napájení. Ve velké míře vychází i z logiky protokolů sběrnice SMBus. Chová se jako převodník SMBus CAN. Proto je doporučeno se seznámit i s předchozími podkapitolami, především podkapitolou 5.1. Modul správy napájení zahajuje komunikaci pouze v případě, že je nastaveno automatické zasílání údajů o akumulátoru. V ostatních případech komunikuje pouze v režimu dotaz-odpověď.

Požadavky na vytvoření protokolu kompatibilního se zbylou částí systému mobilní platformy byly shrnuty v 3.3. Podle uvedené logiky bylo modulu správy napájení přiřazeno ID 0x0E. Protokol detailně shrnuje tabulka D.1 uvedená v příloze. Dále je uveden význam jednotlivých sloupců tabulky. Bit R/W určuje směr přenosu. Pokud nabývá hodnoty 1, jedná se o přenos z počítače do modulu, pokud hodnoty 0, je přenos směrem z modulu do počítače. Pole ID zprávy slouží k rozpoznání jednotlivých druhů zpráv. Z ID modulu

správy napájení, bitu R/W a ID zprávy je složeno celé 11-bitové ID, uvedené ve sloupci ID Hex. Sloupec DLC značí počet bajtů v rámci. Pokud je nulový, jedná se o remote frame. V případech, kdy je uvedeno „X“, je počet bajtů závislý na konkrétním příkazu. Zbytek sloupců obsahuje popis 1 až 8 datových bajtů. Doplnující informace ke každé zprávě jsou uvedeny níže.

**Výchozí nastavení BQ24725A** Nastavení všech 4 registrů integrovaného obvodu. Po náběhu napájení jsou tyto hodnoty automaticky zapsány do BQ24725A a je podle nich řízen proces nabíjení.

**Analogové hodnoty** Požadavek na přečtení analogových veličin. Těmi jsou napětí stejnosměrného zdroje, proud odebíraný ze stejnosměrného zdroje a proud nabíječky.

**Odpověď – analogové hodnoty**  $U_{in}$  – napětí stejnosměrného zdroje, 16 bitů, [mV].  $I_{adp}$  – proud stejnosměrného zdroje, 16 bitů, [mA].  $I_{chg}$  – nabíjecí proud, 16 bitů, [mA].

**Perioda – akumulátor data** Po uplynutí nastaveného času je automaticky odeslán rámec s nejdůležitějšími informacemi o akumulátoru. 0 – vypnuto. 1-255 – perioda odesílání,  $\times 100$  [ms].

**Akumulátor data** Automaticky odesílaný rámec se souhrnem informací o akumulátoru.  $PackVoltage$  – součet napětí všech článků akumulátoru, 16 bitů, [mV].  $PackCurrent$  – proud odebíraný z akumulátoru, 16 bitů, dvojkový doplněk, [mA],  $\times 4$  (Scale Factor).  $RSOC$  – relativní stupeň nabití, 8 bitů, 0-100 %.

**SMBus Write Word** Přístup ke sběrnici SMBus, protokol Write Word. Nutno specifikovat adresu zařízení slave, příkaz a datové bajty. Pořadí datových bajtů vysílaných a čtených z SMBus se vždy shoduje s pořadím bajtů v rámcich CAN – toto platí pro celý protokol.

**SMBus Read Word** Přístup ke sběrnici SMBus, protokol Read Word. Nutno specifikovat adresu zařízení slave a příkaz. Po přečtení dat ze zařízení jsou data automaticky navracena – viz. následující řádek tabulky.

**Odpověď na SMBus Read Word** Odpověď na předchozí požadavek čtení ze zařízení. Je navracena adresa zařízení, příkaz a přečtená data.

**SMBus Write Block – info** Příprava na zápis na SMBus protokolem Write Block. Uvede se adresa, příkaz a celkový počet datových bajtů (1-34). Po obdržení tohoto rámce jsou očekávány rámce SMBus Write Block - data 1-5.

**SMBus Write Block – data 1-5** Rámce obsahující data určená k zápisu na SMBus protokolem Write Block. Identifikátor rámců a pořadí bajtů v nich určuje, v jakém sledu jsou posílány na SMBus. Velikost dat je obecně proměnné číslo, závislé na

druhu příkazu. Rámce je potřeba plnit od prvního bajtu výš. Například při zápisu 10 bajtů je využit celý rámec SMBus Write Block – data 1 a první dva bajty z rámce SMBus Write Block – data 2 (nikoliv celý rámec).

**SMBus Read Block** Přečtení dat protokolem Read Block. Po přijetí tohoto rámce je mikrokontrolérem zahájeno čtení z SMBus. Jakmile jsou k dispozici přečtená data, je nejprve odeslán rámec Odpověď Read Block - info a následně Odpověď Read Block – data 1-5.

**Odpověď Read Block – info** Po přečtení dat ze zařízení na SMBus je odeslán po CAN nejprve tento rámec obsahující adresu, příkaz a počet přečtených datových bajtů.

**Odpověď Read Block – data 1-5** Jednotlivé rámce obsahují přečtená data. Logika je stejná jako u protokolu Write Block. Tedy je zachováno pořadí bajtů shodně se sběrnici SMBus.

**Chyba** Vyjádření chyby při zpracování zprávy. Pro indikaci chyby jsou využity jednotlivé bity z prvního bajtu. Bit 0 – chyba na sběrnici SMBus, například pokud byla zadána špatná adresa nebo příkaz, který zařízení slave na sběrnici nerozpoznalo. Bit 1 – chyba DLC, očekávaná délka rámce se neshoduje s identifikátorem rámce. Bit 2 – nebyla dodána kompletní data v případě protokolů Read Block a Write Block. Chybový rámec je odeslán pouze pokud dojde k výskytu chyb.

Následuje ukázka práce s vytvořeným protokolem. Jedná se o čtyři příklady v tabulce 5.1, kde je ukázána komunikace po SMBus.

- Zápis proudu 4160 mA (0x1040) do registru ChargeCurrent (0x14) BQ24725A (0x12).
- Přečtení hodnoty napětí celého akumulátoru Voltage (0x09) z BQ40Z80 (0x16). Odpověď na předchozí čtení – např. napětí 0x268E=9870 mV.
- Simulace stisku tlačítka DISP funkcí LED DISPLAY PRESS (0x002C) s využitím přístupu ManufacturerBlockAccess (0x44) BQ40Z80 (0x16). Výsledkem je dočasné rozsvícení všech LED diod.
- Přečtení DeviceName (0x21) z BQ40Z80 (0x16). Odpověď na předchozí čtení je příchozí řetězec 7 znaků „BQ40Z80“.

Název zprávy	ID Hex	DLC	1.byte	2.byte	3.byte	4.byte	5.byte	6.byte	7.byte	8.byte
SMBus Write Word	0x3aa	4	0x12	0x14	0x40	0x10				
SMBus Read Word	0x3ab	2	0x16	0x09						
Odpověď na SMBus Read Word	0x38c	4	0x16	0x09	0x8E	0x26				
SMBus Write Block - info	0x3ad	3	0x16	0x44	0x02					
SMBus Write Block - data 1	0x3ae	2	0x2C	0x00						
SMBus Read Block	0x3b3	2	0x16	0x21						
Odpověď Read Block - info	0x394	3	0x16	0x21	0x07					
Odpověď Read Block - data 1	0x395	7	B	Q	4	0	Z	8	0	

**Tab. 5.1:** Příklady práce s vytvořeným protokolem pro sběrnici CAN

# 6

## Navržené zařízení

### 6.1 Konečná verze modulu správy napájení

V konečné verzi modulu správy napájení byly sloučeny oba navržené prototypy na jeden plošný spoj. K nim byl připojen mikrokontrolér STM32L476RG. Dále byl doplněn step-down měnič pro zajištění napájení 3,3 V a budič sběrnice CAN. Také byly vybrány vhodné konektory, aby mohl být modul snadno připojen k již existující elektronice mobilní platformy. Kompletní schéma modulu správy napájení je k dispozici v příloze A. Fotografie hotového modulu správy napájení lze vidět v příloze B.3.

Změny v hardwaru nabíječky zmíněné v 4.1.3 byly samozřejmě zahrnuty. Podařilo se tak především dosáhnout vyššího dobíjecího proudu o hodnotě 8 A. Při závěrečném testování nabíječky byla také změřena účinnost. Při výstupním proudu 2 A byla účinnost přibližně 95 %. To také odpovídá hodnotám uvedeným v dokumentaci BQ24725A.[17] Při maximálním proudu 8 A účinnost poklesla k 90 %.

Prototyp s BQ40Z80 se během prvního testování osvědčil a nevyžadoval žádné zásadní změny v návrhu plošného spoje. Druhá verze byla pouze doplněna o chladič tranzistorů Q7 a Q8. V průběhu testování finální verze byl při běžném pohybu mobilní platformy naměřen proud 16 A. Nutno poznamenat, že se nejedná o špičkovou hodnotu, ale o průměrnou hodnotu naměřenou obvodem BQ40Z80. Ve ztížených podmínkách, kdy bylo zamezeno pohybu mobilní platformy směrem vpřed a docházelo k protáčení pásů se značným odporem, se proud vyšplhal až ke hranici 30 A. U výkonových tranzistorů Q7, Q8 a snímacího rezistoru 1 mΩ nebylo při těchto proudech znatelné zvýšení teploty. Je zde tak dostatečná rezerva pro případ ještě nepříznivější situace, například pokud by se mobilní platforma pohybovala náročným terénem.

Aby bylo možné komunikovat po sběrnici CAN s modulem správy napájení přímo z počítače v mobilní platformě, bude v budoucnu nutné upravit řídicí aplikaci. Z toho důvodu byla komunikace po CAN nejprve odladěna v režimu loopback. Následně byla komunikace simulována mezi modulem správy napájení a vývojovým kitem Nucleo. Díky tomu se podařilo odstranit několik logických chyb v programu mikrokontroléru. Komunikační protokol tak funguje dle očekávání a je připravený k použití.

## 6.2 Obsluha modulu správy napájení

Obsluha zařízení je z hlediska uživatele velice jednoduchá. Po připojení DC zdroje s doporučeným napětím 15 V a schopností dodat proud 8 A dojde k zahájení nabíjení, pokud již není akumulátor plně nabit. Jakmile je zahájeno nabíjení, dojde k rozsvícení LED displeje, na kterém je zobrazen aktuální stav nabití. Po ukončení nabíjení je displej automaticky vypnut. Pro snazší orientaci je rozložení komponent na DPS zobrazeno v příloze E.1.

V případě kontroly stavu nabití stačí zmáčknout tlačítko DISP a hodnota je zobrazena na LED displeji. Displej je složen ze šesti LED diod. Aby bylo dosaženo většího rozlišení displeje, je využito blikání diodami. Tímto způsobem je rozlišeno celkem 12 úrovní stavu nabití. Například pro stav 60-70% budou tři LED svítit a čtvrtá bude blikat. Při 70-80% budou už svítit čtyři diody ze šesti. Samozřejmě lze stav nabití vyčíst i po SMBus.

Pokud by po zapnutí hlavního vypínače mobilní platformy nedošlo k jejímu automatickému zapnutí, byla na modulu správy napájení pravděpodobně aktivována funkce bezpečnostního vypínače. Deaktivace se provede stiskem tlačítka SHUTDN po dobu jedné vteřiny. To samé platí i pro aktivaci funkce (viz 4.2.1).

Obvod BQ40Z80 je primárně určen k integraci přímo do battery packu, stává se tak jeho nedílnou součástí a je z něj neustále napájen. Pokud by došlo k situaci, kdy je potřeba modul od akumulátoru odpojit, je doporučeno nejdříve odpojit hlavní konektor a až poté konektor s vývody z jednotlivých článků (balanční konektor). Při připojování je postup opačný. Odpojením dojde samozřejmě k výpadku napájení. Po opětovném připojení akumulátoru k modulu správy napájení se musí „probudit“ obvod BQ40Z80. Nejjednodušším řešením je krátce spustit nabíjení, tedy připojit DC zdroj na vstupní svorky. Poté se automaticky provede inicializace BQ40Z80, načte se nastavení z paměti flash a BQ40Z80, respektive celý modul správy napájení, je plně funkční. Správnou činnost BQ40Z80 lze ověřit stiskem tlačítka DISP, které rozsvítí LED displej. Podrobnější popis postupu probuzení BQ40Z80 je uveden v 5.3.1.

## 6.3 Limitní hodnoty pro bezpečný provoz

Na vstup pro DC zdroj je doporučeno připojit zdroj o napětí 15 V a schopností dodat proud 8 A. Napětí zdroje může být v rozsahu 13-17 V. Pokud by bylo mimo tento rozsah, dojde k přerušení nabíjení. V žádném případě nesmí napětí překročit 30 V.

Co se napětí akumulátoru týče, je obvod BQ40Z80 schopen snést na většině svých vstupů až 35 V. A to platí i pro vstupy jednotlivých článků, které je možné připojovat v libovolném pořadí. V případě tříčlánkového Li-Ion akumulátoru by napětí nemělo přesáhnout 12,6 V.

Jak již bylo uvedeno dříve, pro sledování teploty článků byl akumulátor doplněn o NTC termistor. Také je sledováno napětí článků a kontrolována velikost proudu odebíraného nebo dodávaného do akumulátoru. V případě překročení limitních hodnot je provedena

akce, jedná se především o uzavření jednoho nebo obou tranzistorů (Q7, Q8), aby se zabránilo dalšímu nabíjení nebo vybíjení. Většina ochran je součástí přímo BQ40Z80. Název aktivovaných ochran, práh pro jejich spuštění a obnovení stručně shrnuje tabulka 6.1. Doplněn byl i časový limit nabíjení maximálně 24 hodin, což bylo podrobněji vysvětleno v 5.4.

Název ochrany	Zkratka	Práh	Zpoždění	Obnovení
Přetížení při vybíjení	AOLD	83 A	31ms	5 s
Zkrat při nabíjení	ASCC	44 A	915 $\mu$ s	5 s
Zkrat při vybíjení	ASCD	200 A	915 $\mu$ s	5 s
Podpětí článků	CUV	2500 mV	2 s	3000 mV
Přepětí článků	COV	4300 mV	2 s	3900 mV
Zvýšená teplota při nabíjení	OTC	55°C	2 s	50°C
Zvýšená teplota při vybíjení	OTD	60°C	2 s	55°C
Přebíjení	OC	1000 mAh	-	90 % SOC

**Tab. 6.1:** Souhrn aktivovaných ochran v rámci BQ40Z80



# 7

## Závěr

Po bližším prostudování problematiky týkající se nabíjení a správy Li-Ion akumulátorů bylo přistoupeno k návrhu dvou na sobě nezávislých prototypů. Tyto prototypy byly již v rané fázi vývoje konstruovány tak, aby byla zajištěna kompatibilita s celým systémem mobilní platformy. Hlavní úskalí se týkalo především velikosti proudu odebíraného z akumulátoru. Díky tomu, že vývoj probíhal ve dvou fázích, se podařilo odstranit množství nedostatků již v zárodku. Například výběrem vhodnějších komponent a úpravou designu plošného spoje byl nabíjecí proud zvýšen z původních 5 A na 8 A, což je maximum dosažitelné s integrovaným obvodem BQ24725A. Důsledkem toho trvá proces nabíjení znatelně kratší dobu.

Jako dostatečně robustní se ukázalo řešení pro monitorování a ochranu akumulátoru založené na integrovaném obvodu BQ40Z80. Navržená obvodová konfigurace je schopna snést jak vysoké špičkové proudy, odebírané dvěma stejnosměrnými motory, tak trvalé zatížení v řádu desítek ampér. Navíc je obvodem BQ40Z80 poskytována celá řada užitečných informací o stavu akumulátoru. K prodloužení životnosti akumulátoru přispěje možnost pasivního balancování nebo také nastavené ochrany, díky kterým nebudou překročeny doporučené provozní meze.

Po zástavbě finální verze navrženého zařízení do mobilní platformy následovalo testování, během kterého se neprojeví žádné nedostatky. Průběh testování byl popsán v 6.1. Obsluha zařízení je velmi jednoduchá a základní kroky jsou popsány v podkapitole 6.2.

V případě potřeby lze s modulem správy napájení komunikovat prostřednictvím sběrnice CAN. Komunikační protokol vychází ze zavedených pravidel. Pro plné využití potenciálu vytvořeného zařízení bude nutné upravit řídicí aplikaci mobilní platformy tak, aby načítala poskytovaná data. Tím se otevírá prostor pro další zajímavé závěrečné práce a projekt mobilní platformy se může nadále vylepšovat. Navíc nebyly zdaleka vyčerpány všechny možnosti a rozmanité funkce obvodu BQ40Z80.

Výsledkem této diplomové práce je tedy plně funkční systém, který dokáže zcela samostatně zajistit nabíjení, balancování a sledování stavu Li-Ion akumulátoru. Celkově lze shrnout, že byly splněny všechny body zadání.

# Literatura

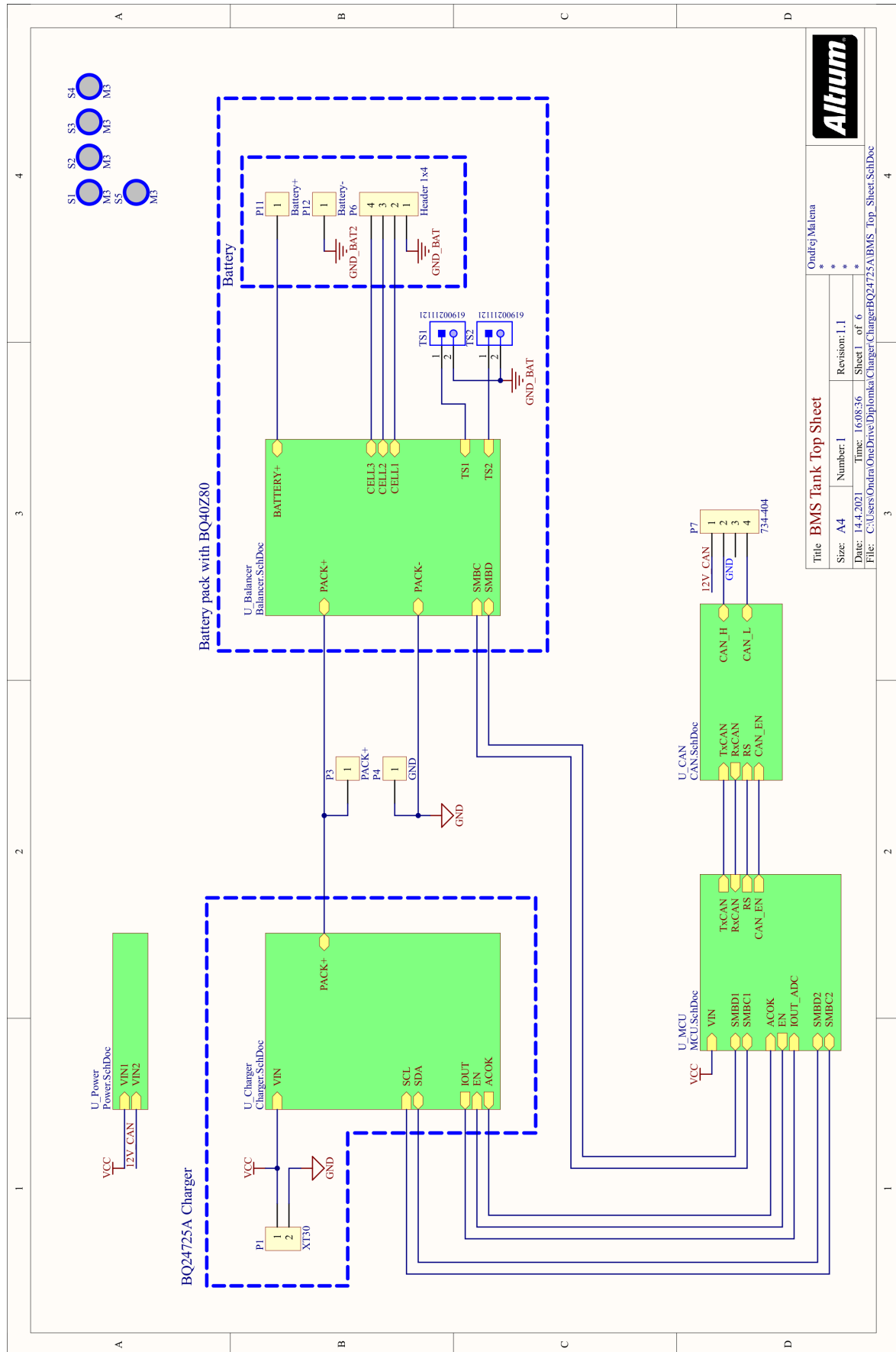
- [1] HAMMERBAUER, Jiří. *Učební texty k předmětu KEI/NZAS* [online]. [cit. 13. 1. 2021]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/portal/studium/courseware/kei/nzas>
- [2] Battery University Group. *BU-205: Types of Lithium-ion* [online]. Poslední změna 11. 2. 2021 [cit. 6. 4. 2021]. Dostupné z: [https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/types_of_lithium_ion)
- [3] BELZA, Jaroslav. *Akumulátory Li-ion a jejich nabíjení* [online]. Poslední změna 2. 4. 2001 [cit. 13. 1. 2021]. Dostupné z: <https://www.belza.cz/charge/liion1.htm>
- [4] VALDA, Lukáš. *Metody a algoritmy vyvažování sériově řazených lithiových článků*. Plzeň, 2016. Disertační práce. Západočeská Univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací.
- [5] Battery University Group. *BU-304: Why are Protection Circuits Needed?* [online]. Poslední změna 30. 7. 2019 [cit. 13. 1. 2021]. Dostupné z: [https://batteryuniversity.com/learn/article/safety\\_circuits\\_for\\_modern\\_batteries](https://batteryuniversity.com/learn/article/safety_circuits_for_modern_batteries)
- [6] YAO, Xingyan a KONG, Lingxi a PECHT, Michael. *Reliability of Cylindrical Li-ion Battery Safety Vents* [online]. 2017 [cit. 13. 1. 2021]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/341657945\\_Reliability\\_of\\_Cylindrical\\_Li-ion\\_Battery\\_Safety\\_Vents](https://www.researchgate.net/publication/341657945_Reliability_of_Cylindrical_Li-ion_Battery_Safety_Vents)
- [7] Texas Instruments [online katalogový list]. *BQ2980, BQ2982 Datasheet - SLUSCS3F*. 2020 [cit. 13. 1. 2021]. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/BQ2980>
- [8] Sony Chemicals Corporation [online katalogový list]. *SC Protector*. 1. 4. 2006 [cit. 13. 1. 2021]. Dostupné z: [http://tomsyty.pl/datasheets/s/sc\\_protector.pdf](http://tomsyty.pl/datasheets/s/sc_protector.pdf)
- [9] LUFINKA, Ondřej. *Tank* [online]. Poslední změna 4. 10. 2019, 08:24 [cit. 10. 1. 2021]. Dostupné z: <http://projekty.fel.zcu.cz/index.php/Tank>
- [10] ZVONAŘ, Filip. *Softwarové vybavení autonomního prostředku*. Plzeň, 2020. Diplomová práce. Západočeská Univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací.

- [11] LUFINKA, Ondřej. *Využití ovladače Kinect k řízení mobilní platformy*. Plzeň, 2015. Diplomová práce. Západočeská Univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací.
- [12] PUŠMAN, Lukáš. *Řídicí systém systému mobilní platformy*. Plzeň, 2011. Diplomová práce. Západočeská Univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací.
- [13] ŠTĚTKA, Petr. *Senzorová výbava mobilní platformy*. Plzeň, 2011. Diplomová práce. Západočeská Univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací.
- [14] Panasonic corp. [online katalogový list]. *CGR18650CH LITHIUM ION*. 2011 [cit. 10. 3. 2021]. Dostupné z: <https://datasheetspdf.com/pdf/949447/Panasonic/CGR18650CH/1>
- [15] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1998. ISBN 80-7082-411-5.
- [16] FORTUNATO, Mark. *Temperature and Voltage Variation Ceramic Capacitor* [online]. Poslední změna 26. 11. 2012, [cit. 26. 1. 2021]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/tutorials/5/5527.html>
- [17] Texas Instruments [online katalogový list]. *BQ24725 Datasheet - SLUS702A*. 2010 [cit. 12. 1. 2021]. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/BQ24725#tech-docs>
- [18] System Management Interface Forum, Inc. *System Management Bus (SMBus) Specification* [online]. 11. 12. 1998 [cit. 2. 2. 2021]. Dostupné z: <http://www.smbus.org/specs/smbus110.pdf>
- [19] Texas Instruments [online katalogový list]. *BQ40Z80 Datasheet - SLUSBV4B*. 2020 [cit. 25. 1. 2021]. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/BQ40Z80#tech-docs>
- [20] Texas Instruments [online katalogový list]. *BQ40Z80 Technical Reference - SLUUBT5B*. 2019 [cit. 25. 1. 2021]. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/BQ40Z80#tech-docs>
- [21] DAVIDE, Andrea. *White Paper - How much balancing current do you need?* [online]. 16. 2. 2010 [cit. 13. 1. 2021]. Dostupné z: [http://liionbms.com/php/wp\\_balance\\_current.php](http://liionbms.com/php/wp_balance_current.php)
- [22] OXLEY, Stephen. *10 Tips for Designing with Current Sense Resistors* [online]. 28. 1. 2016 [cit. 12. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.electropages.com/blog/2016/01/10-tips-for-designing-with-current-sense-resistors>

- [23] STMicroelectronics. *STM32 Nucleo (64 pins) schematics 1.0* [online]. 2018 [cit. 3. 2. 2021]. Dostupné z: [https://www.st.com/resource/en/schematic\\_pack/nucleo\\_64pins\\_sch.zip](https://www.st.com/resource/en/schematic_pack/nucleo_64pins_sch.zip)
- [24] MALENA, Ondřej. *Řídicí jednotka kolejových úseků pro modelovou železnici*. Plzeň, 2018. Bakalářská práce. Západočeská Univerzita. Fakulta elektrotechnická. Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací.
- [25] STMicroelectronics. *STM32 Nucleo-64 boards (MB1136) - UM1724* [online]. 2020 [cit. 2. 2. 2021]. Dostupné z: [https://www.st.com/resource/en/user\\_manual/dm00105823-stm32-nucleo-64-boards-mb1136-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00105823-stm32-nucleo-64-boards-mb1136-stmicroelectronics.pdf)
- [26] FISCHER, Jan. *Programování STM32F042 pomocí Nucleo* [online]. Poslední změna 4. 11. 2019 [cit. 2. 2. 2021]. Dostupné z: [embedded.fel.cvut.cz/sites/default/files/kurzy/LPE\\_SW/Progr\\_Nucleo303\\_F042\\_5.pdf](http://embedded.fel.cvut.cz/sites/default/files/kurzy/LPE_SW/Progr_Nucleo303_F042_5.pdf)
- [27] STMicroelectronics [online katalogový list]. *RM0351 Reference manual*. 2020 [cit. 3. 2. 2021]. Dostupné z: [https://www.st.com/resource/en/reference\\_manual/dm00083560-stm32l47xxx-stm32l48xxx-stm32l49xxx-and-stm32l4axxx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/reference_manual/dm00083560-stm32l47xxx-stm32l48xxx-stm32l49xxx-and-stm32l4axxx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf)
- [28] STMicroelectronics [online katalogový list]. *STM32L476xx Data-sheet - DS10198 Rev 8*. 2019 [cit. 2. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l476je.pdf>
- [29] HERRING, Chris. *[TUTORIAL] Interrupt Driven TWI Interface for AVR (Part 1: MT/MR)* [online]. 3. 8. 2014 [cit. 1. 3. 2021]. Dostupné z: <http://www.chrisherring.net/all/tutorial-interrupt-driven-twi-interface-for-avr-part1/>
- [30] Texas Instruments [online]. *bq40z80EVM Li-Ion Battery Pack Manager Evaluation Module - SLUUBZ5*. 2018 [cit. 11. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.ti.com/tool/BQ40Z80EVM-020#tech-docs>
- [31] Texas Instruments [online]. *bq40z80 Manufacture, Production, and Calibration - SLUA868*. 2018 [cit. 11. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/BQ40Z80#tech-docs>
- [32] Texas Instruments [online]. *How to Complete a Successful Learning Cycle for the bq40z80 - SLUA848*. 2018 [cit. 11. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/BQ40Z80#tech-docs>

# **Příloha A**

## **Kompletní schéma navrženého zařízení**

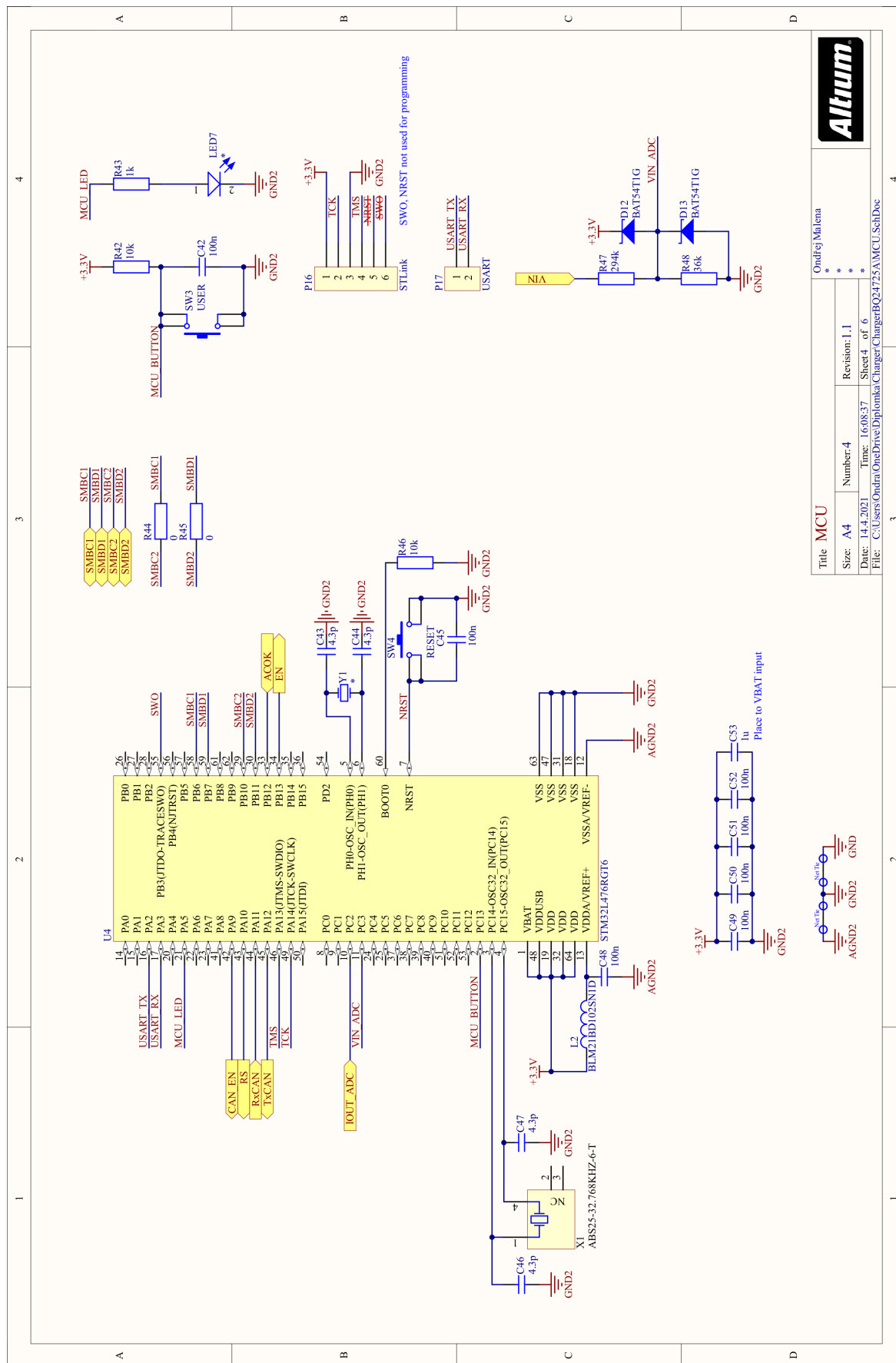


Obr. A.1: Blokové zapojení hlavních částí návrhu

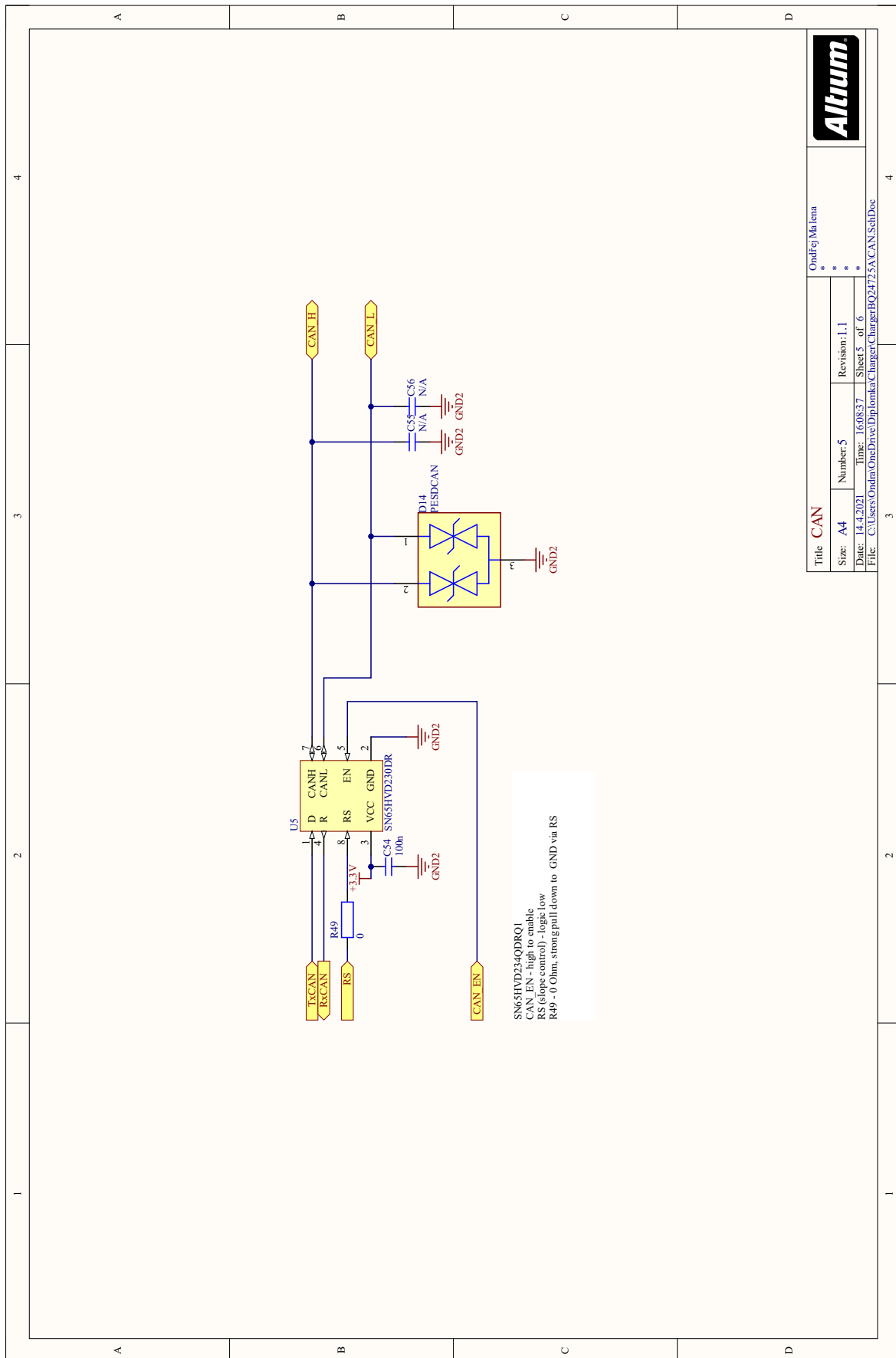




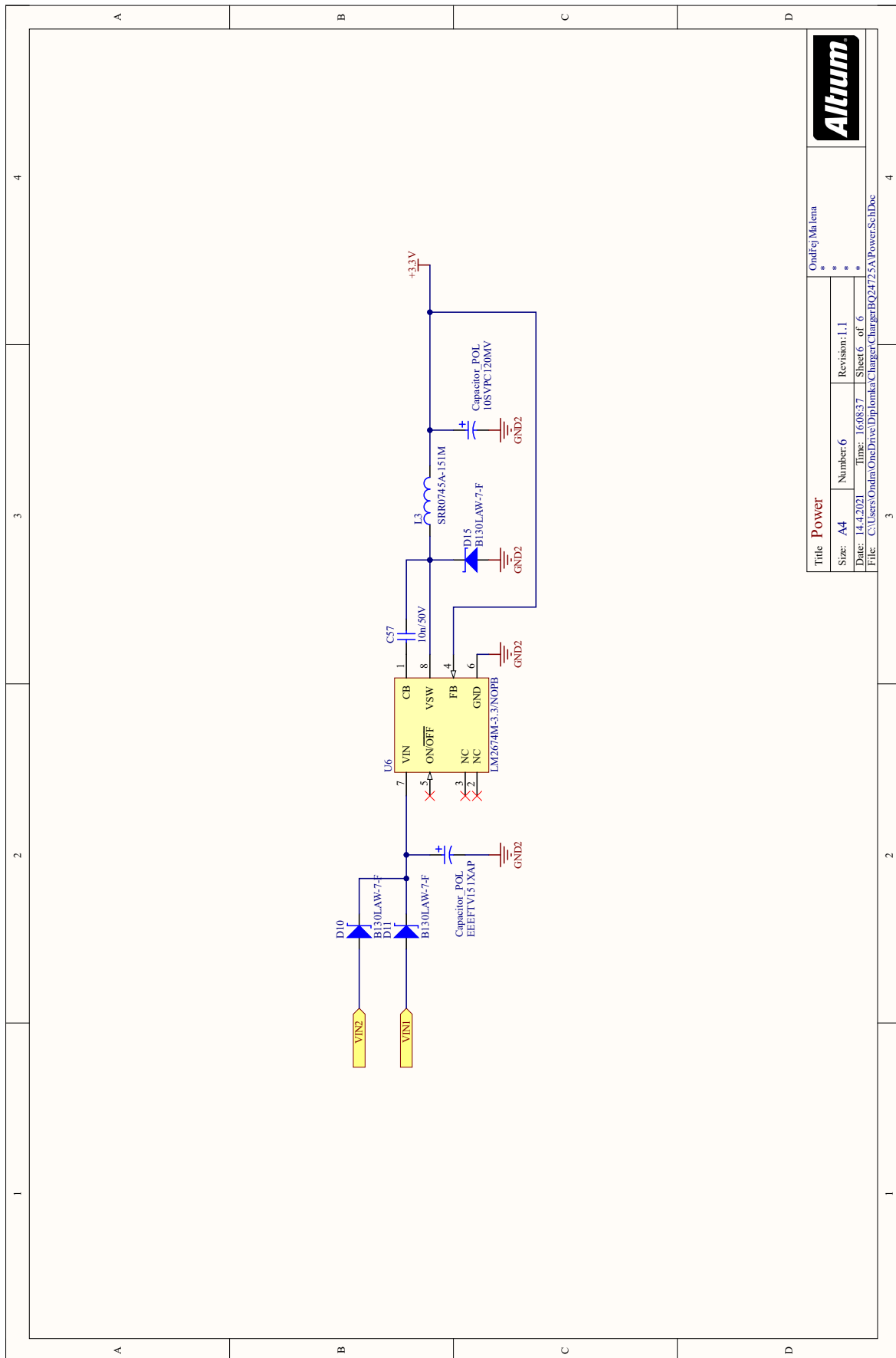




Obr. A.4: Schéma mikrokontroléru a s ním souvisejících obvodů



Obr. A.5: Schéma budiče sběrnice CAN

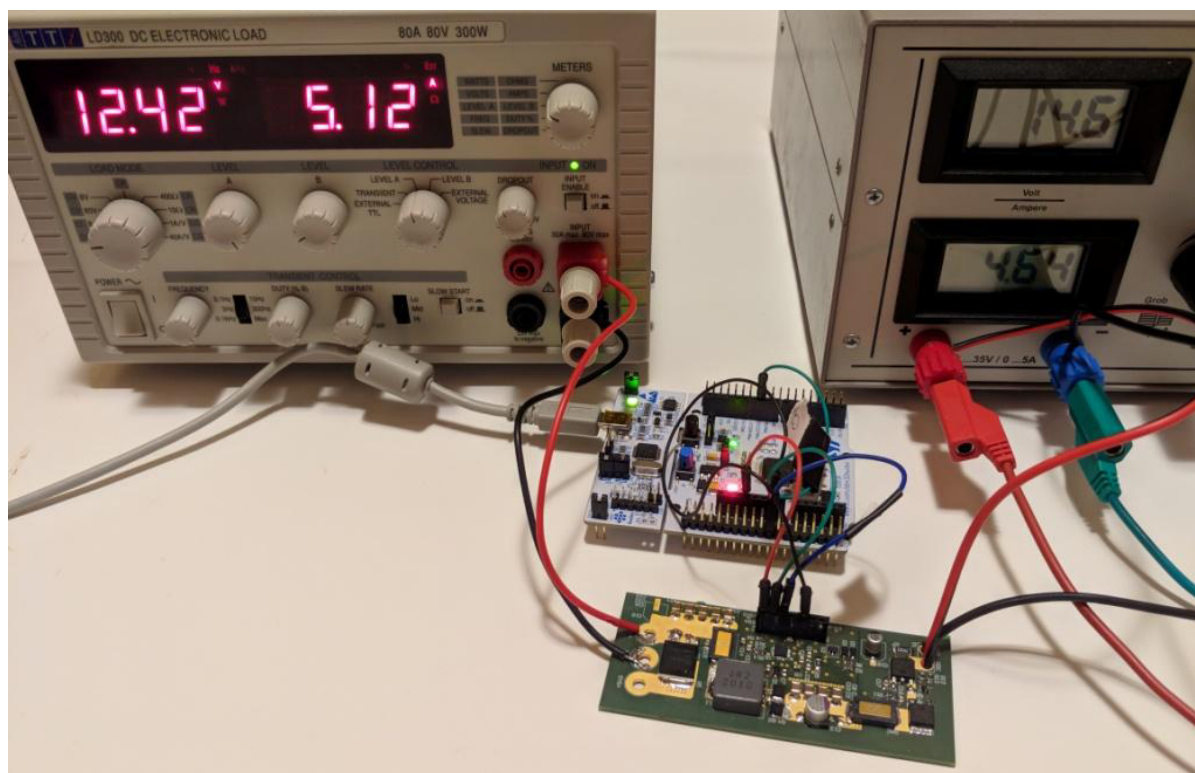


Obr. A.6: Schéma step-down měniče pro napájení větve 3,3 V

# Příloha B

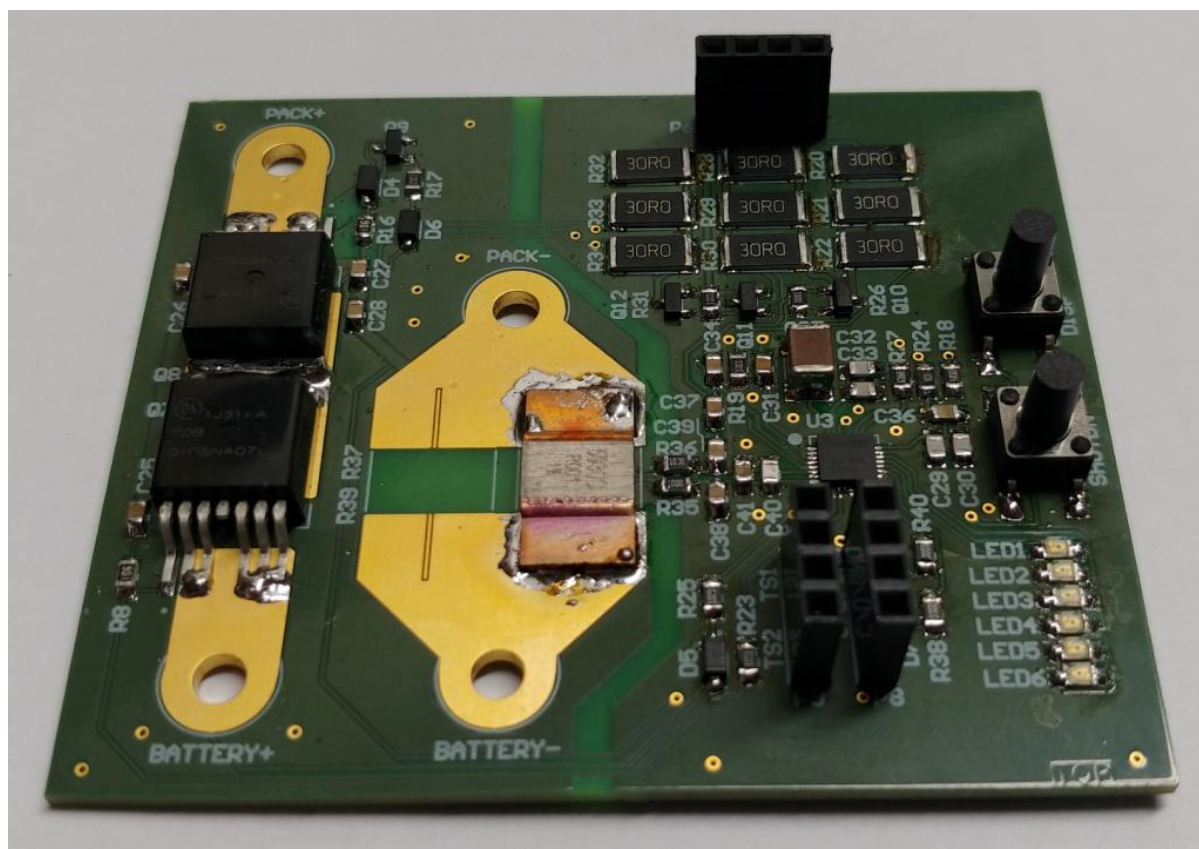
## Navržené desky plošných spojů

### B.1 Test prototypu nabíječky BQ24725A



**Obr. B.1:** Testování nabíjení na elektronické zátěži při nastaveném proudu 5120 mA.

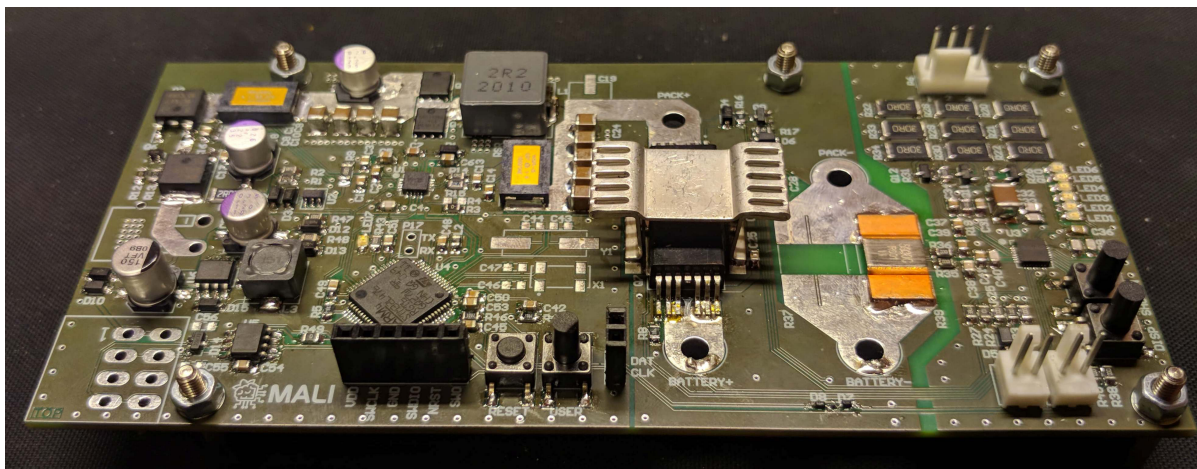
## B.2 Osazená prototypová deska s BQ40Z80



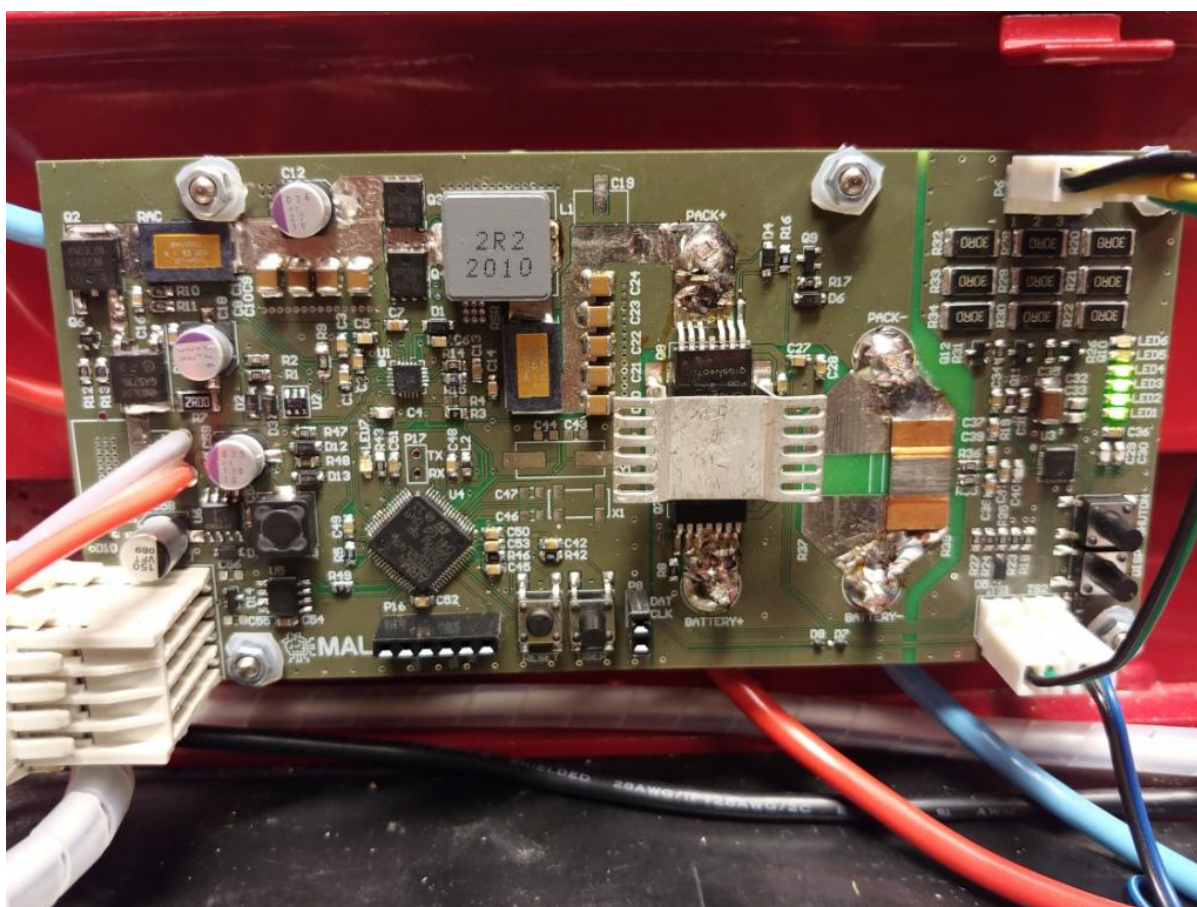
Obr. B.2: Pohled na horní stranu DPS s battery management systémem BQ40Z80.



### B.3 Finální verze desky modulu správy napájení



Obr. B.3: Druhá verze DPS po osazení součástek.



Obr. B.4: Hotová DPS vestavěná do útrob mobilní platformy.

# **Příloha C**

## **Práce s programem bqStudio**

The screenshot displays the bqStudio interface with the following sections:

- Top Panel:** Shows system information: EV2400 Version:0.18, SMB, bq40z80 4800.0.04 Addr:0x17, 2018 degC. A status bar indicates "Auto Refresh is ON - Click to Turn OFF".
- Registers:** A table listing various battery parameters.
 

Name	Value	Units
Manufacturer Access	0x6181	hex
Remaining Cap. Alarm	300	mAh
Remaining Time Alarm	10	min
At Rate	0	mA
At Rate Time To Full	65535	min
At Rate Time To Empty	65535	min
At Rate OK	1	-
Temperature	20.9	degC
Voltage	12519	mV
Current	0	mA
Average Current	3	mA
Max. Error	3	%
Relative State of Charge	100	%
Absolute State of Charge	88	%
Remaining Capacity	23637	mAh
Full charge Capacity	23637	mAh
- Bit Registers:** A table listing bit-level status and control registers.
 

Name	Value	Bit
Battery Mode (high)	0x6001	Bit7
Battery Mode (low)	0x00E0	Bit6
Battery Status (high)	0x6181	Bit5
Battery Status (low)	0x0000	Bit4
Operation Status (high)	0x08	Bit3
Operation Status (low)	0x00C8	Bit2
Temp Range (high)	0x5A	Bit1
Temp Range (low)	0x0211	Bit0
Charging Status (high)	0x0208	Bit0
Charging Status (low)		
Gauging Status (high)		
Gauging Status (low)		
IT Status (high)		
IT Status (low)		
Manufacturing Status (high)		
Manufacturing Status (low)		
- Registers (continued):** A table listing cell and pack registers.
 

Name	Value	Units
Cell 3 Current	0	mA
Cell 4 Current	0	mA
Cell 5 Current	0	mA
Cell 6 Current	0	mA
Cell 7 Current	0	mA
Cell 1 Power	0	cW
Cell 2 Power	0	cW
Cell 3 Power	0	cW
Cell 4 Power	0	cW
Cell 5 Power	0	cW
Cell 6 Power	0	cW
Cell 7 Power	0	cW
Average Power	0	cW
Relative State of Charge	100	%
Absolute State of Charge	88	%
Remaining Capacity	23637	mAh
Full charge Capacity	23637	mAh
- Bit Registers (continued):** A table listing bit-level status and control registers.
 

Name	Value	Units
Cell 1 RaScale	0	m...
Cell 2 RaScale	0	m...
Cell 3 RaScale	0	m...
Cell 4 RaScale	0	m...
Cell 5 RaScale	0	m...
Cell 6 RaScale	0	m...
Cell 7 RaScale	0	m...
Cell 1 CompRes	0	m...
Cell 2 CompRes	0	m...
Cell 3 CompRes	0	m...
Cell 4 CompRes	0	m...
Cell 5 CompRes	0	m...
Cell 6 CompRes	0	m...
Cell 7 CompRes	0	m...
PackGrid	14	-
Cell 1 Grid	0	-
Cell 2 Grid	0	-
Cell 3 Grid	0	-
Cell 4 Grid	0	-
- Commands:** A list of control commands such as FW\_VERSION, FW\_BUILD, CHEM\_ID, SHUTDOWN, IATA\_SHUTDOWN, CC\_OFFSET, PDSG\_FET\_TOGGLE, PCHG\_FET\_TOGGLE, CHG\_FET\_TOGGLE, DSG\_FET\_TOGGLE, GAUGE\_EN, FET\_EN, LIFETIME\_EN, LT\_RESET, LT\_FLUSH, LT\_TEST, PE\_EN, PF\_CLEAR.
- Log Panel:** A table showing transaction logs with columns for Name, Cmd, and Result.

Obř. C.1: Screenshot z programu bqStudio, kde je zobrazen obsah některĚch registrů z pŕipojenĚho BQ40Z80.



## **Příloha D**

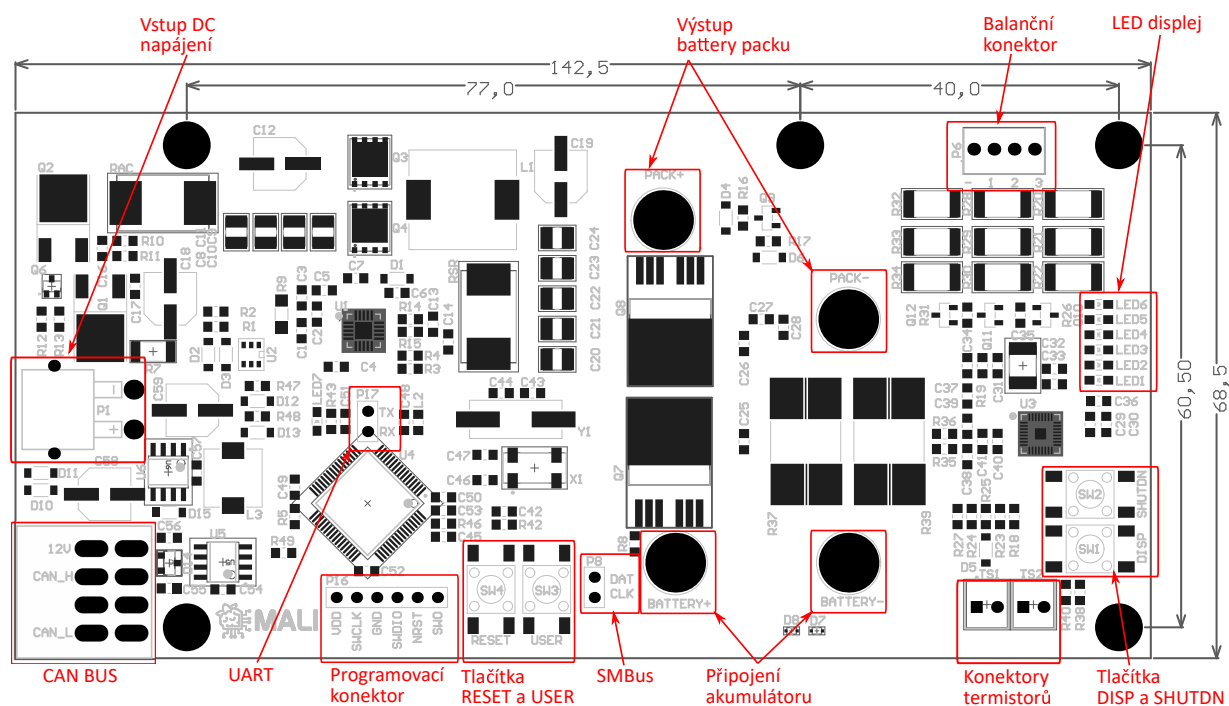
### **Vytvořený komunikační protokol po sběrnici CAN**

Název zprávy	R/W	ID zprávy	ID Hex	DLC	1.byte	2.byte	3.byte	4.byte	5.byte	6.byte	7.byte	8.byte
Výchozí nastavení BQ24725A	1	00001	0x3a1	8	ChargeCurrent[7:0]	ChargeCurrent[15:8]	ChargeVoltage[7:0]	ChargeVoltage[15:8]	InputCurrent[7:0]	InputCurrent[15:8]	ChargeOption[7:0]	ChargeOption[15:8]
Analogové hodnoty	1	00011	0x3a3	0								
Odpověď - analogové hodnoty	0	00100	0x384	6	Uin[7:0]	Uin[15:8]	ladp[7:0]	ladp[15:8]	Ichg[7:0]	Ichg[15:8]		
Perioda - akumulátor data	1	00101	0x3A5	1	Tmessage							
Akumulátor data	0	00110	0x386	5	PackVoltage[7:0]	PackVoltage[15:8]	PackCurrent[7:0]	PackCurrent[15:8]	RSOC			
SMBus Write Word	1	01010	0x3aa	4	Address	Command	Low Data Byte	High Data Byte				
SMBus Read Word	1	01011	0x3ab	2	Address	Command	Low Data Byte	High Data Byte				
Odpověď na SMBus Read Word	0	01100	0x38c	4	Address	Command	Low Data Byte	High Data Byte				
SMBus Write Block - info	1	01101	0x3ad	3	Address	Command	Byte Count					
SMBus Write Block - data 1	1	01110	0x3ae	X 1. Byte	2. Byte	3. Byte	3. Byte	4. Byte	5. Byte	6. Byte	7. Byte	8. Byte
SMBus Write Block - data 2	1	01111	0x3af	X 9. Byte	10. Byte	11. Byte	11. Byte	12. Byte	13. Byte	14. Byte	15. Byte	16. Byte
SMBus Write Block - data 3	1	10000	0x3b0	X 17. Byte	18. Byte	19. Byte	19. Byte	20. Byte	21. Byte	22. Byte	23. Byte	24. Byte
SMBus Write Block - data 4	1	10001	0x3b1	X 25. Byte	26. Byte	27. Byte	27. Byte	28. Byte	29. Byte	30. Byte	31. Byte	32. Byte
SMBus Write Block - data 5	1	10010	0x3b2	X 33. Byte	34. Byte							
SMBus Read Block	1	10011	0x3b3	2	Address	Command						
Odpověď Read Block - info	0	10100	0x394	3	Address	Command	Byte Count					
Odpověď Read Block - data 1	0	10101	0x395	X 1. Byte	2. Byte	3. Byte	3. Byte	4. Byte	5. Byte	6. Byte	7. Byte	8. Byte
Odpověď Read Block - data 2	0	10110	0x396	X 9. Byte	10. Byte	11. Byte	11. Byte	12. Byte	13. Byte	14. Byte	15. Byte	16. Byte
Odpověď Read Block - data 3	0	10111	0x397	X 17. Byte	18. Byte	19. Byte	19. Byte	20. Byte	21. Byte	22. Byte	23. Byte	24. Byte
Odpověď Read Block - data 4	0	11000	0x398	X 25. Byte	26. Byte	27. Byte	27. Byte	28. Byte	29. Byte	30. Byte	31. Byte	32. Byte
Odpověď Read Block - data 5	0	11001	0x399	X 33. Byte	34. Byte							
Chyba	0	11111	0x39F	1	Kód chyby							

Tab. D.1: Souhrn všech zpráv komunikačního protokolu CAN

# Příloha E

## Umístění konektorů a tlačítek modulu správy napájení



**Obr. E.1:** Umístění konektorů a tlačítek modulu správy napájení. U jednotlivých pinů konektoru je uveden název připojeného signálu. Taktéž jsou označena tlačítka pro ovládání MCU a BQ40Z80. Uvedené rozměry DPS a rozteče montážních otvorů jsou v milimetrech.

# Příloha F

## CD se soubory projektu

Na přiloženém CD je několik adresářů, ve kterých lze dohledat soubory vytvořené při vývoji modulu správy napájení. Dále je uveden název a stručný obsah jednotlivých adresářů.

**Altium** – Projekt se schématy a návrhem DPS v programu Altium Designer.

**TrueSTUDIO** – Projekt v programu Atollic TrueStudio s kódem pro mikrokontrolér v jazyce C. Projekt v programu STM32CubeMX obsahující hardwarovou konfiguraci mikrokontroléru.

**Tabulky Excel** – Podpůrné tabulky vytvořené v programu Excel při vývoji, například pro CAN protokol či výpočty související s obvodem BQ24725A.

**Závěrečné práce** – Složka obsahující závěrečné práce týkající se projektu mobilní platformy.

**Golden File** – Zálaha firmware BQ40Z80 ve formátu .srec s dokončenou konfigurací a úspěšně provedenými cykly učení.