



Fakulta elektrotechnická
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh software pro jednotku řízení akumulátorů (BMS)

Autor práce: Bc. Jiří Očenášek
Vedoucí práce: Ing. Bedřich Bednář,

Plzeň 2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

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

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří OČENÁŠEK**
Osobní číslo: **E18N0029P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**
Téma práce: **Návrh software pro jednotku řízení akumulátorů (BMS)**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Zásady pro vypracování

Student navrhne software určený pro jednotku řízení akumulátorů. Tato jednotka je určena pro elektrická vozidla projektovaná na katedře KEV.

1. Podrobně se seznamte s již navrženou elektronikou pro BMS. (Pro úspěšné navržení SW je vyžadována kompletní znalost všech komponent programované elektroniky).
2. Seznamte se s pravidly projektu elektrické studentské formule a aplikujte poznatky při tvorbě SW.
3. Navrhněte strukturu SW tak, aby byl modifikovatelný a bylo ho možné používat v několika HW verzích BMS.
4. Při návrhu dbejte na bezpečnost a stabilitu z důvodu implementace SW do elektrického vozidla.
5. Experimentálně otestujte navržený SW.

Práce bude využita také pro projekt elektrické studentské formule.

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

Seznam doporučené literatury:

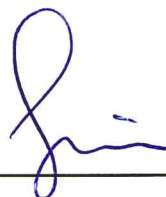
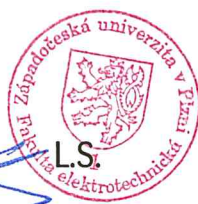
Mann Burkhard – C pro mikrokontroléry

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Bedřich Bednář**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



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



Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

Abstrakt

Práce si klade za cíl popsat návrh softwaru pro systém řízení akumulátorů, jenž byl doplněn i o popis návrhu hardwarové části systému. Systém bude schopen měřit a balancovat jednotlivé články obvodu.

Klíčová slova

BMS, Akumulátor, BQ76PL455A-Q1, Li-ion

Abstract

Očenášek, Jiří. *Software design for Battery Management System [Návrh software pro jednotku řízení akumulátorů (BMS)]*. Pilsen, 2020. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Bedřich Bednář

The main goal of this thesis is to describe a design of software for Battery Management System. Description of BMS hardware was added to the project. The system will be able to measure and balance each of the connected battery cells.

Keywords

BMS, BQ76PL455A-Q1, Li-ion, battery

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 17. června 2020

Bc. Jiří Očenášek



.....
Podpis

Poděkování

Tento příspěvek vznikl s podporou Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu SGS-2018-009 a možnost využití infrastruktury RICE při realizaci diplomové práce.

Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam symbolů a zkratek	ix
Úvod	1
1 Elektrochemické zdroje proudu	2
1.1 Základní pojmy	2
1.2 Lithium-iontové akumulátory	5
1.3 Typy Li-ion akumulátorů	5
1.3.1 Dělení na základě chemického složení katody	5
1.3.2 Konstrukční provedení Li-ion článků	7
2 Battery Management System	13
2.1 Balancování akumulátorů	14
2.1.1 Aktivní balancování	14
2.1.2 Pasivní balancování	14
2.2 Dostupná řešení bateriového managementu	15
2.2.1 NXP - MC33772B	15
2.2.2 RENESAS - ISL78714	16
2.2.3 Texas Instruments - bq76PL455A-Q1	17
3 Návrh zapojení BMS s obvodem bq76PL455A-Q1	18
3.1 Single Ended komunikace	18
3.2 Daisy Chain komunikace	18
3.3 Vstupní obvod bq76PL455A-Q1	19
3.4 Napájení bq76PL455A-Q1	22
3.5 Zemnění pro bq76PL455A-Q1	24
3.6 Provozní režimy obvodu bq76PL455A-Q1	25
3.7 Komunikační část obvodu bq76PL455A-Q1	28
3.8 Řídící modul	29

4	Pravidla Formula Student	32
4.1	Teplota akumulátoru	34
4.2	Napětí článků	34
4.3	Naměřené hodnoty	34
4.4	Pravidla pro systém správy akumulátorů (BMS)	34
5	Návrh softwaru pro bq76PL455A-Q1	36
5.1	Komunikace řídicího modulu s bq76PL455A-Q1	36
5.1.1	Komunikace UART	38
5.1.2	Výhody UART komunikace	39
5.1.3	Nevýhody UART komunikace	39
5.1.4	Controlled Area Network	40
5.1.5	Kroky pro automatické adresování	41
5.1.6	Formát příkazů při komunikaci s bq76PL455A-Q1	41
5.2	Program pro komunikaci s bq76PL455A-Q1	42
5.2.1	Ukázka kódu pro komunikaci s bq76PL455A-Q1	47
5.3	Odvození stavu nabití akumulátoru	50
5.3.1	Metoda měření bezproudového napětí	50
5.3.2	Coulombova metoda počítání náboje	50
5.4	Balancování článků v obvodu bq76PL455A-Q1	51
6	Experimentální oživení BMS obvodu	53
	Závěr	56
	Reference, použitá literatura	58
	Přílohy	61
A	Schémata zapojení, DPS	61
A.1	Vstupní část	61
A.2	Napájecí část	61
A.3	Zapojení prvního modulu	61
A.4	Zapojení druhého modulu	61
A.5	Měřicí AUX vstupy	61
A.6	Konektory mikrokontroléru a budič CAN	61
A.7	Návrh desky plošných spojů	61
A.8	3D render	61
B	Zdrojové kódy	69
B.1	WriteReg.c	69
B.2	WriteFrame.c	70

Seznam obrázků

1.1	Bezproudivé napětí jako funkce stavu nabití Li-ion článku Převzato z [4] 	3
1.2	Závislost kapacity na teplotě při vybíjení Li-ion článku Převzato z [1] 	5
1.3	Závislost kapacity na teplotě při samovybití u Li-ion akumulátorů při skladování Převzato z [10] 	6
1.4	Vybíjecí křivka Li-ion akumulátoru v závislosti na anodovém materiálu Převzato z [1] 	6
1.5	Vnitřní struktura knoflíkového Li-ion článku Převzato z [7] 	8
1.6	Typický vzhled knoflíkových článků Převzato z [7] 	9
1.7	Prizmatický článek s vrstvenou konstrukcí v kovovém obalu Převzato z [7] 	9
1.8	Měkký prizmatický článek Převzato z [7] 	10
1.9	Měkký prizmatický článek při poruchovém stavu Převzato z [7] 	11
1.10	Cylindrické Li-ion články typu 18650 Převzato z [7] 	12
1.11	Cylindrické LTO články typu 66160H Převzato z [9] 	12
2.1	Ilustrace sérioparalelní kombinace článků v akumulátoru Převzato z [31] 	14
2.2	Schéma principu pasivního balancování Převzato z [33] 	15
2.3	Produktový obrázek obvodu MC33772B Převzato z [16] 	16
2.4	Zjednodušené schéma MC33772B Převzato z [16] 	16
2.5	Typická aplikace zapojení ISL78714 Převzato z [17] 	17
3.1	Výřez vstupního obvodu pro filtraci a balancování článků	19
3.2	Příklad zapojení vstupního obvodu s méně než 16 články Převzato z [20] 	20
3.3	Detail vstupní části master modulu na DPS	20
3.4	Příklad zapojení vstupního obvodu pro 16 článků Převzato z [20] 	21
3.5	Zjednodušené funkční schéma obvodu bq76PL455A-Q1 Převzato z [19] 	22
3.6	Použité schéma lineárního napájení obvodu s NPN tranzistorem (nahore) a detail obvodu na DPS (dole)	23
3.7	Doporučené zapojení externích kondenzátorů pro V5VAO a VREF Převzato z [20] 	24
3.8	Doporučené zapojení externích kondenzátorů pro nábojovou pumpu Převzato z [20] 	24
3.9	Zjednodušené rozvržení zemnění na DPS (vrchní a spodní vrstva vlevo, střední vrstvy vpravo) Převzato z [19] 	25
3.10	Zjednodušené zapojení bq76PL455A-Q1 jako komunikačního můstku Převzato z [21] 	26

3.11	Zjednodušené zapojení bq76PL455A-Q1 jako Single Ended Převzato z [21] . . .	27
3.12	Zakončení pinu WAKEUP u řídicího modulu (vlevo) a podřazených modulů (vpravo) Převzato z [20] 	27
3.13	Doporučené schéma komunikační části mezi dvěma moduly v rámci jedné DPS Převzato z [21] 	28
3.14	Schéma komunikační části (vlevo) a detail na DPS (vpravo)	28
3.15	Mikrokontrolér TM4C123GH6PM od TI Převzato z [19] 	29
3.16	Přehled low power režimů pro mikrokontroléry řady TIVA C Převzato z [24] . .	31
4.1	Foto ze závodu Formula Student Italy 2019 Převzato z [32] 	33
5.1	Standardní tvar rámce UART Převzato z [23] 	39
5.2	Příklad komunikačního rámce pro bq76PL455A-Q1 Převzato z [19] 	42
5.3	Strom hodin mikrokontroléru TM4C123GH6PM Převzato z [26] 	43
6.1	Foto z inspekce DPS	53
6.2	Foto z prvotního oživení při testování jednoho modulu (vlevo) a obou mo- dulů současně (vpravo)	54
6.3	Zachycení obrazovky při příjmu dat na základě příkazu	55
6.4	Obvod BMS při měření napětí na člancích (vlevo), aktivní balancovací tranzistory (vpravo)	55
A.1	Vstupní část prvního modulu v architektuře	62
A.2	Vstupní část druhého modulu v architektuře	63
A.3	Napájecí část obvodu s lineárním regulátorem napětí	63
A.4	Zapojení prvního modulu obvodu BQ76PL455A-Q1	64
A.5	Zapojení druhého modulu obvodu BQ76PL455A-Q1	65
A.6	Zapojení měřících AUX vstupů pro měření teplot	66
A.7	Zapojení rozhraní pro řídicí mikrokontrolér a budiče CAN	66
A.8	Návrh desky plošných spojů	67
A.9	3D render DPS	68
A.10	3D render DPS	68

Seznam symbolů a zkratek

AMS	Accumulator Management System. Systém pro správu akumulátorů.
BMS	Battery Management System. Systém pro správu bateriových článků.
CAN	Controller Area Network. Komunikační sběrnice.
CRC	Cyclic Redundancy Code. Cyklický redundantní kód.
DMA	Direct Memory Access. Přímý přístup do paměti.
DPS	Deska plošných spojů.
FIFO	Paměť typu zásobník First In - First Out.
GPIO	General Purpose In/Out. Obecný vstup/výstup.
IO	Integrovaný obvod.
LED	Light Emitting diode. Luminescenční dioda.
Li-ion	Lithium-iontové akumulátory.
LSB	Least Significant Bit. Nejméně významný bit.
MSB	Most Significant Bit. Nejvýznamnější bit.
OCV	Open Circuit Voltage. Napětí nezatíženého zdroje.
P	Výkon [W].
PLL	Phase-Locked Loop. Fázový závěs.
Q	Náboj [C].
RTC	Real Time Clock. Hodiny pro odpočet reálného času.
SIMD	Single Instruction, Multiple Data. Typ počítačové architektury.
SOC	State of Charge. Stav nabití článku [%].
SPI	Serial Peripheral Interface. Sériové periferní rozhraní.
TI	Texas Instruments.
U	Napětí [V].

Úvod

Cílem této diplomové práce je navrhnout software pro jednotku řízení lithiových akumulátorů. Navrhovaný systém je obecně známou problematiku, která je známá pod názvem Battery Management System (BMS). Ačkoliv je elektronika zastupující funkci BMS často takřka neviditelnou součástí akumulátorů, je pro její funkci nezbytná. Navržená jednotka bude měřit primární veličiny akumulátorových článků za účelem správné funkce, stejně tak za účelem maximalizace životnosti článků a bezpečnosti při jejich používání. Těmito primárními veličinami jsou napětí, teploty a proudy. Ty budou měřeny cyklicky se stabilní periodou. Systém následně naměřené veličiny vyhodnotí a zareaguje. Do zpětných vazeb systému pro správu akumulátorových článků můžeme zařadit odpojení článků od zbytku obvodu při překročení předem stanovených mezí hodnot napětí, teplot nebo proudů. Další součástí zpětné vazby systému je balancování článků, které slouží k ochraně akumulátorových článků a zvýšení jejich účinnosti jako zdrojů. Celá práce je zaměřena na univerzálnost systému pro využití v co nejširším spektru projektů využívajících akumulátory jako zdroj energie, jakými jsou například elektrická vozidla projektovaná na katedře KEV. Změna požadavků spočívá především v počtu spravovaných článků.

V této práci budou postupně popsány jednotlivé hardwarové části systému od napájení až po komunikační části obvodu. Z hlediska softwaru budou popsány typy komunikace, kterými je systém řízen a pomocí kterých probíhá komunikace systému s okolím. Dále se část práce bude věnovat popisu formátu příkazů pro systém, postupem inicializace komunikačního algoritmu a sestrojení programu pro měření napětí na jednotlivých člancích včetně balancování.

Výsledkem projektu bude funkční algoritmus pro Battery Management System, jehož principy měření se inspirojí pravidly Formula Student - kategorie E. Měřené hodnoty jsou následně vyčítány na terminál počítače přes sériovou komunikaci. Do projektu je zahrnut i popis návrhu hardwarové části, která v době zadání projektu nebyla k dispozici a musela být taktéž navržena.

1

Elektrochemické zdroje proudu

Základem každého bateriového managementu je samotná baterie, která ve formě pospojovaných článků tvoří jeden celek. Tato kapitola se těmito články neboli elektrochemickými zdroji proudu zabývá.

Elektrochemické zdroje proudu (dále EZP) jsou definovány jako zařízení, která slouží k přeměně chemické energie v elektrickou. Během tohoto procesu vybíjení EZP dochází k uvolnění energie ve formě stejnosměrného elektrického proudu. Za elektrochemický zdroj lze považovat jednotlivé články nebo celé baterie z těchto článků složené.

Elektrochemické zdroje lze podle základního kritéria rozdělit na tyto dva typy:

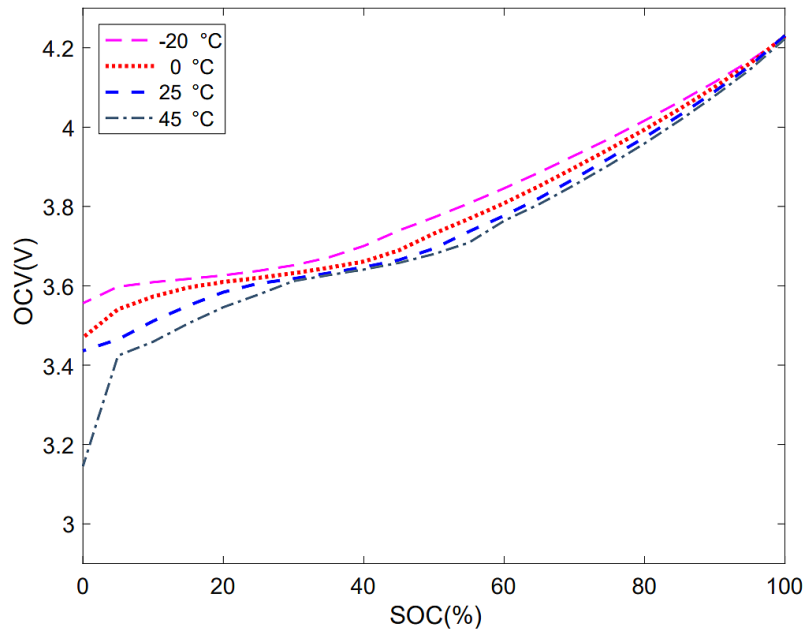
- primární,
- sekundární (akumulátory). [1]

Vzhledem k tomu, že problematika ukládání elektrické energie a podrobnější popis EZP je již uveden v mé předchozí práci (viz [2]), budou v této kapitole uvedeny pouze základní pojmy týkající se EZP a práce se bude dále zabývat převážně lithiovými články. Pro vytvoření funkčního bateriového managementu je však zásadní znát základní pojmy, které jsou ve formě veličin primárních (přímo měřených) nebo sekundárních. Sekundární veličiny jsou odvozovány z veličin primárních.

1.1 Základní pojmy

- **Bezproudivé napětí** – bezproudivé napětí lze měřit v případě nezatíženého článku, jak již název vypovídá. Hladina bezproudivého napětí závisí na několika faktorech. Kromě typu elektrochemického zdroje (olověné, Nikl-kadmiové, Nikl-metal hydridové, Lithium-iontové a další) se může tato hodnota lišit i na základě koncentrace elektrolytu a plynu v článku, stupně vybití, teploty a dalších. U Li-ion článků se napětí typicky pohybuje od 3,5 V do 4,2 V. Bezproudivé napětí se v cizojazyčné literatuře nazývá Open Circuit Voltage (OCV) a je funkcí stavu nabití článku. Na obrázku 1.1 můžeme takovou funkci pozorovat při různých teplotách. Zatímco od 0

do 25 °C se bezproudové napětí kolem vybitého stavu liší nepatrně, při teplotě 45 °C napětí strmě padá pod 3,2 V. Je nutné připomenout, že s rostoucí teplotou exponenciálně klesá životnost baterie. Charakteristika je typicky u elektrochemických zdrojů nelineární. To je způsobeno proměnlivou hodnotou vnitřního efektivního odporu. Ten se mění vlivem změny odporu na elektrodách článku. [1][2][3][4]



Obr. 1.1: Beproudové napětí jako funkce stavu nabití Li-ion článku [Převzato z [4]]

- **Vybíjecí napětí** – je silně závislé například na teplotě článku, technologických a konstrukčních parametrech a dalších. Oproti bezproudovému napětí je rozsah vybíjecího napětí výrazně ztelnější. Křivka napětí vybíjeného článku v závislosti na proudu ve voltampérové charakteristice může při vybíjení konstantním proudem klesat téměř lineárně. V jiném případě můžeme dokonce pozorovat na počátku vybíjení nárůst napětí následovaný poklesem. Pokles vybíjecího napětí může být též způsoben poklesem bezproudového napětí, jak je tomu například u Li-ion článků. Vzhledem ke strmosti změny napětí na počátku cyklu se provádí měření až po odebrání části kapacity (typicky 10%). Ukončení vybíjecího cyklu je pak zvoleno na základě konečného napětí vzhledem k požadovanému rozsahu napětí pro spotřebič a tvaru vybíjecí křivky. [1]
- **Vnitřní odpor článku** – jak již bylo zmíněno, vnitřní odpor článku ovlivňuje tvar voltampérové charakteristiky a mění se během vybíjení článku. V průběhu životnosti článku v rámci procesu stárnutí vnitřní odpor článku roste. Pokud je známo bezproudové napětí a zároveň napětí článku spolu s proudem, kterým je článek vybíjen, je možné vnitřní odpor nepřímo změřit. Rovnice je následující:

$$R_{DC} = \frac{U_0 - U_V}{I} \quad [\Omega, V, A], \quad (1.1)$$

kde U_0 je bezproudové napětí, U_V je vybíjecí napětí a I je odebíraný proud zátěží. [1][3]

- **Střední hodnota napětí** – jedná se o aritmetický průměr hodnot napětí měřených v průběhu doby vybíjení článku. Doporučený počet odečtů je alespoň pět.

$$U_{st} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \quad [V, -, V] \quad (1.2)$$

N je v tomto případě počet měření, U_i je pak i -té měřené napětí. [1]

- **Maximální výkon** – vzhledem k průběžnému poklesu napětí v průběhu vybíjení článku dochází i k postupnému poklesu výkonu. Pokud bude odpor zátěže R_{ex} roven zdánlivému odporu článku R_s a napětí U_v rovno polovině bezproudového napětí U_{ot} , lze vyjádřit maximální výkon P_{max} jako:

$$P_{max} = \frac{U_{ot}^2}{R_s} \quad [W, V, \Omega] \quad (1.3)$$

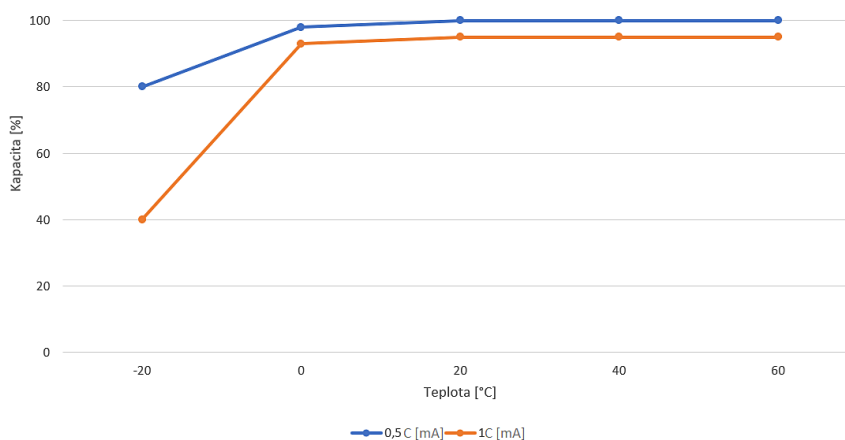
Existuje několik vybíjecích režimů na základě požadavků zátěže:

- vybíjení s konstantním odporem zátěže** – při tomto režimu dochází k poklesu vybíjecího proudu spolu s napětím, přičemž vnější odpor obvodu zůstává konstantní.
- Vybíjení za konstantního proudu,**
- vybíjení za konstantního výkonu** – za tohoto režimu dochází k zachování výkonu, což má za následek pokles napětí a současně růst proudu během vybíjení.
- Vybíjení při proměnné zátěži** – Tento způsob zahrnuje jak průběžné, tak přerušované vybíjení s různě dlouhými přestávkami. [1]

V případě elektrochemických zdrojů se také setkáváme s pojmy, jako je například „maximální přípustný proud“. Tato veličina charakterizuje hranici, nad kterou již není doporučeno zdroj využívat. Za stejným účelem existuje i hodnota maximálního výkonu zdroje. Důležitým uváděným parametrem u EZP je také kapacita. Jedná se o veličinu popisující vydaný elektrický náboj, který je čerpán z baterie. Elektrický náboj se značí Q a jeho jednotkou je C (Coulomb). Ten je roven $1 As$ (Ampérsekunda) a velmi často se kapacita uvádí v Ampérhodinách. $1 Ah = 3600 C$. [1]

1.2 Lithium-iontové akumulátory

Li-ion akumulátory se mohou pyšnit příznivým poměrem výkonu, hmotnosti a malými rozměry. Stejně tak patří mezi jejich přednosti poměrně malé samovybíjení. To by mělo dosahovat v případě akumulátoru bez defektu okolo 5 % během prvních 24 hodin a následně až 2 % za měsíc. Tyto hodnoty však velmi silně souvisí s podmínkami skladování. S rostoucí teplotou a stavem nabití tak roste intenzita samovybíjení při skladování. Oproti stavu používání (aktivní vybíjení baterie), kdy pro dosažení co možná nejvyšší kapacity baterie je ideální teplota výše nad $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, bývá v případě skladování je požadavek na teplotu výrazně nižší. Závislost kapacity a teploty u Li-ion baterie je zobrazen na obrázku 1.2. [1]



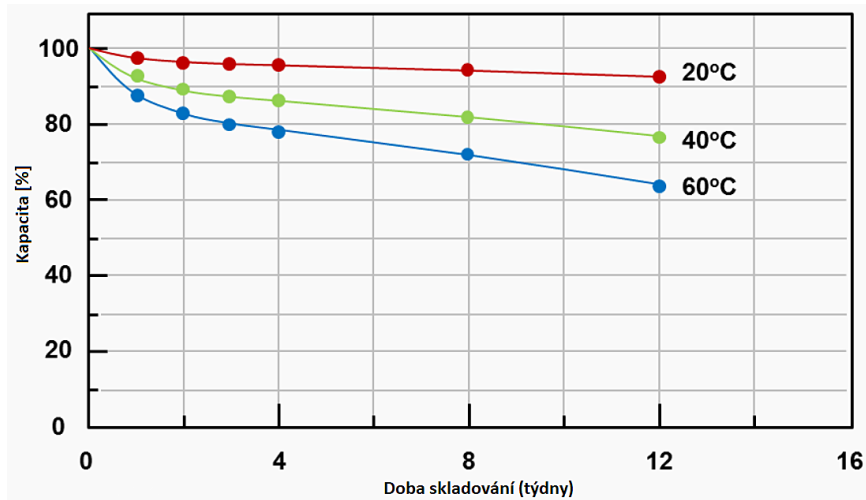
Obr. 1.2: Závislost kapacity na teplotě při vybíjení Li-ion článku |Převzato z [1]]

Z obrázku je vidět, že lepších vlastností baterie dosahuje v oblasti $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ při vybíjecím proudu $0,5\text{ C}$. Z obrázku 1.3 oproti tomu vyplývá, že při skladování dosahují Li-ion baterie lepších výsledků při nižších teplotách. Pro $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ je kapacita po dvanácti týdnech skladování o zhruba 30 % nižší. Rozdíl je tedy významný. [1][10][8]

1.3 Typy Li-ion akumulátorů

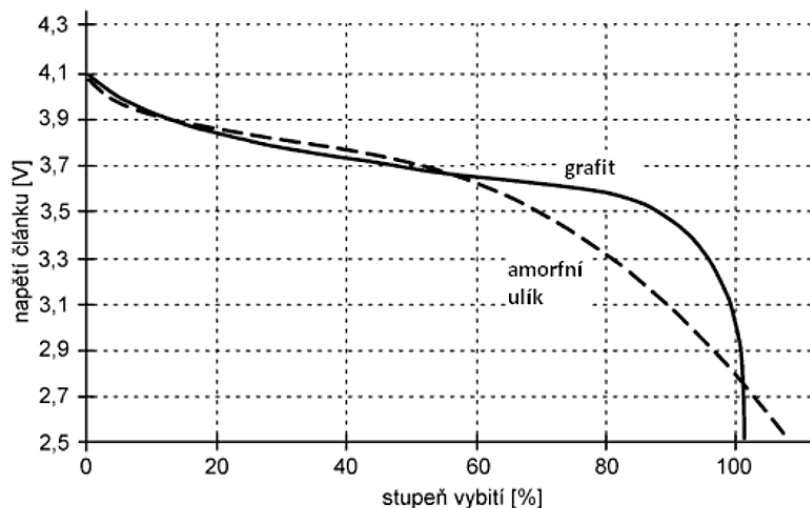
1.3.1 Dělení na základě chemického složení katody

Záporná elektroda těchto akumulátorů je tvořena lithiem (Li). V minulosti bylo pro výrobu používáno lithium v pevné formě. Takovéto provedení mělo však za následek hoření při reakci se vzduchem a nebylo možné hasit články vodou. To činilo z Li-ion akumulátorů nebezpečnou záležitost a situace se obrátila až když bylo kovové lithium nahrazeno dnes používanými ionty lithia. Ty se pak interkalují v rámci aktivních směsí. Interkalace je proces, kdy dochází k přijetí iontu do hostitelské mřížky, přičemž nedochází ke změně struktury hostitele nebo změně jen velmi mírné. Pro anody (záporné elektrody) jsou typicky používány dva materiály. Jednak amorfni uhlík, také známý pod pojmem „koks“



Obr. 1.3: Závislost kapacity na teplotě při samovybití u Li-ion akumulátorů při skladování [Převzato z [10]]

nebo grafit. V obou případech se jedná o uhlík, avšak vybíjecí charakteristika se liší (viz obr. 1.4)



Obr. 1.4: Vybíjecí křivka Li-ion akumulátoru v závislosti na anodovém materiálu [Převzato z [1]]

Na obrázku je zřetelný rozdíl ve vybíjecích křivkách pro oba materiály. Zatím co pokles v posledních 40% kapacity je u amorfního uhlíku relativně pozvolný a stabilní, u grafitu dochází k prudkému poklesu napětí až během posledních 10% kapacity. Při vhodně zvoleném konečném stupni vybití lze udržet s grafitovou anodou déle napětí před jeho poklesem.

- **LiCoO₂** – Akumulátor s kyslíčkem kobaltu a lithia byl uveden na trh v roce 1991 firmou Sony po několika neúspěšných pokusech ve vývoji Li-ion akumulátorů. Jedná se o materiál s vrstvenou strukturou. V porovnání s ostatními typy lithiových článků je pro hustotu energie tento typ často používán například v přenosných zařízeních,

jako jsou mobilní telefony nebo počítače. Oproti ostatním typům disponuje relativně nízkým elektrochemickým výkonem, který se postupným opotřebením a degradací struktury snižuje, stejně tak krátkou životností.

- **LiNiO₂** – I tento materiál je (stejně jako předchozí) formován do vrstev. Jeho hlavní výhodou je nižší cena a větší kapacita v miliAmpérhodinách na jeden gram. Jedná se tedy o nadějný materiál pro katody Li-ion baterií. Slabá stránka tohoto materiálu se pak skýtá v přípravě během výroby a to zejména díky komplikacím při oxidaci niklu.
- **LiFePO₄** – Tento materiál disponuje příznivými výsledky téměř ve všech vlastnostech v porovnání s jinými typy. Je schopen poskytnout relativně vysoký elektrochemický výkon a akumulátory nabízí vysokou úroveň bezpečného použití. Pořizovací cena akumulátorů je nízká a životnost dlouhá. Akumulátory toho typu jsou velmi často používány například v elektrických motocyklech a dalších aplikacích, kde je vyžadována dlouhá životnost a zvýšená bezpečnost.
- **LiMn₂O₄** – Tento typ akumulátorů je používán například v lékařských zařízeních nebo výkonových nástrojích. Nevýhoda tohoto typu akumulátorů spočívá v nízké životnosti a celkově podprůměrné výkonnosti.
- **Li-S** – Novinkou jsou akumulátory typu lithium-síra. Zatímco články typu Li-ion dosahují svého limitu co se energetické hustoty týče, Li-S články mají obrovský potenciál být nejlepší možnou technologií na trhu. Hustotou energie teoreticky mohou překonat dostupné lithiové články za nižší cenu a menším znečištěním vzniklým při výrobním procesu. [1][5][11][12][13]
- **Li₄Ti₅O₁₂** – Lithium-titanátové akumulátorové články, v praxi označované jako LTO, mají rozdíl od Li-ion článků, u kterých je anodovým materiálem grafit, anodu tvořenou sloučeninou z oxidu titaničitého a oxidu lithného. LTO články jsou schopny pracovat v rozmezí teplot od -30 - 50 °C a poskytují větší množství nabíjecích cyklů v průběhu životnosti (až nad 7000 cyklů). Články je možné nabíjet rychleji díky možnosti bezpečného provozu při proudu až 10 C. Výhodou oproti současným Li-ion článkům je také zvýšená úroveň stability a bezpečnosti při použití, stejně tak jsou LTO šetrnější k životnímu prostředí. Hodí se tedy pro aplikace, kde je vyžadována vysoká bezpečnost za relativně nepříznivých podmínek a dlouhá životnost (ostrovní bateriově napájená zařízení). Fotografie LTO článků je na obrázku 1.11. [9]

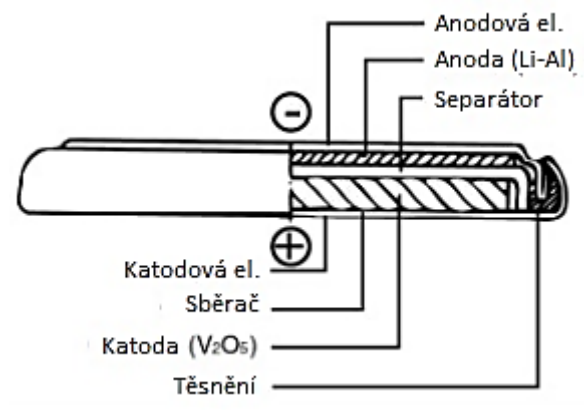
1.3.2 Konstrukční provedení Li-ion článků

S Li-ion články se můžeme setkat v několika formách, ve kterých jsou běžně vyráběny. Každý typ konstrukce článků má své využití a na základě jejich vlastností lze vybrat daný

typ pro konkrétní aplikaci.

- **Plochý článek (knoflíkový)** – Tento typ článku umožnil výrobu přenosných zařízení o kompaktnějších rozměrech vzhledem k velikosti článku. V případě potřeby vyššího napětí byly tyto články spojovány do trubice. Typické využití se našlo například v bezdrátových telefonech, zdravotnických nástrojích nebo letištních příručních detektorech.

Vzhledem k nízké ceně a možnosti spojování článků do trubice byl tento konstrukční typ článků základem pro další konvenční formáty baterií. Nevýhodou konstrukčního řešení byla deformace při příliš rychlém nabití, kdy docházelo k nafouknutí článku z důvodu chybějícího bezpečnostního tlakového ventilu. Následkem byla potřeba tyto články nabíjet 10 - 16 hodin. Současné provedení těchto článků umožňuje rychlejší nabíjení. Dnes jsou především v této formě používány články primární. Pro představu ohledně konstrukce plochých článků slouží obrázky 1.5 a 1.6. Knoflíkový článek je jediným zástupcem primárních článků z výčtu. [7]



Obr. 1.5: Vnitřní struktura knoflíkového Li-ion článku [Převzato z [7]]

Na obrázku 1.5 můžeme vidět vnitřní strukturu článku. Anodová a katodová směs je oddělena separátorem, kterým je u těchto článků běžně porézní fólie z polyetylenu nebo polypropylenu. Na okrajích článku je po vnitřní straně obvodu těsnění, aby nedošlo ke kontaktu s vnějším prostředím. Bezpečnostní tlakový ventil však chybí. [1]

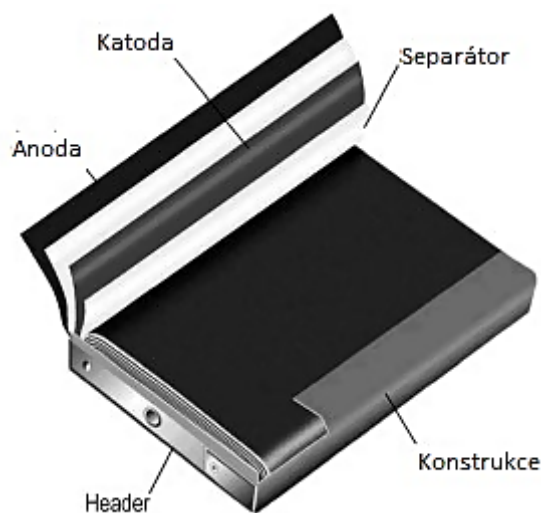
- **Prizmatické články v kovovém obalu** – Tyto články byly představeny v devadesátých letech. Jejich výhodou je tenký rozměr připomínající balíček čokolády. Dobře využitý rozměr článku je následek vrstvené topologie, kdy jsou jednotlivé vrstvy smotané do tvaru konstrukce. Přední využití této konstrukce bylo v rámci mobilních telefonů, tabletů a přenosných počítačů menších rozměrů. Články disponují kapacitou od 800 *mAh* do 4000 *mAh*. Každý výrobce navrhuje vlastní formát konstrukce, jelikož neexistuje žádný univerzální. Prizmatické články jsou k dispozici i ve velkokapacitních variantách o hodnotách až 50 Ah. Vzhledem ke kovovému



Obr. 1.6: Typický vzhled knoflíkových článků [Převzato z [7]]

obalu jsou tyto články zároveň bezpečné. Kovový obal slouží ke kompresi. Mírné nafouknutí článků je v normě vzhledem k růstu vnitřního tlaku. Proto je uvnitř článků rezerva pro tento růst (5 mm). Po 500 cyklech může vzrůst být až 8 mm. Následně je třeba baterii vyměnit, neboť hrozí poškození ostatních komponent zařízení a narušení bezpečnosti.

Zatímco prizmatické kovové články poskytují výhodu především ve svých rozměrech, jejich výrobní cena je vyšší a disponují kratší životností než cylindrické články. Kromě změny rozměrů článků během používání také nejsou schopny obstát v rozmezí teplot jako právě články cylindrické. Prizmatický článek v kovovém obalu je zobrazen na obrázku 1.7. [7][14]



Obr. 1.7: Prizmatický článek s vrstvenou konstrukcí v kovovém obalu [Převzato z [7]]

- **Měkké prizmatické články** – Oproti prizmatickým článkům v kovovém obalu je u těchto článků celá vnitřní stavba zatavena v hermeticky uzavřeném plastu. Tento typ byl představen v roce 1995 a jednalo se o radikální změnu v konstrukci článků. Vodivé folie byly přivařeny k elektrodám a vyvedeny navenek zcela zapečetěny. Tyto

články jsou jednoduchým, flexibilním a váhově lehkým řešením pro elektronické návrhy. Při zapojení více článků je doporučeno, aby byl mezi články vyvíjen vzájemný tlak, avšak je nutné dodržet rezervu pro otoky. Tento typ článků je schopen dodávat vysokým proudům, avšak nejlepších výsledků je dosaženo za mírných podmínek. Odstraněním kovové konstrukce se dosáhlo výrazného snížení váhy a tím i zvýšení efektivity a hustoty energie na jednotku váhy i objemu v rámci battery packu.



Obr. 1.8: Měkký prizmatický článek [Převzato z [7]]

Velkou nevýhodou tohoto typu konstrukce je nízká úroveň bezpečnosti, kdy je při poruše vysoké riziko exploze. Poškození článku se může dostavit na základě přetěžování článků nebo samovolně postupem času během používání. Článek pak může zvětšit svůj objem až několikanásobně (viz obr 1.9)

I přes nevýhody tohoto typu článků se jedná o nejpoužívanější typ ve spotřební elektronice. [7][14]

- **Cylindrické lithiové články** – Cylindrické články jsou stále velmi široce využívány jednak ve formě primárních, tak ve formě sekundárních článků (akumulátorů). Jejich silnou stránkou je snadnost použití a mechanická stabilita právě díky konstrukci. Článek je schopen zachovat si svůj tvar i v případě vysokého vnitřního tlaku. Velké množství takto zkonstruovaných článků obsahuje kladný teplotní koeficient, kdy v případě vystavení příliš vysokého proudového zatížení dochází k zahřátí vodivého polymeru, který se pak stává rezistivním. Tím se omezí tok proudu a jedná se tak o ochranu proti zkratu článku. Po odeznění zkratu a vychladnutí polymeru je článek opět vodivý. Oproti ostatním výše jmenovaným typům článků obsahují



Obr. 1.9: Měkký prizmatický článek při poruchovém stavu [Převzato z [7]]

cylindrické články i ochranný ventil. Tím je membrána, která se v případě přílišného vnitřního tlaku protrhne a je uvolněn přebytečný tlak. Po narušení membrány ventilu existuje možnost vyschnutí článku nebo dokonce únik elektrolytu. Články jsou tedy po uvolnění tlakového ventilu nepoužitelné z hlediska bezpečnosti. Existují však i typy článků, u nichž po uvolnění tlaku dojde k opětovnému uzavření ventilu pomocí pružinového uzávěru. Někteří výrobci poskytují obvody pro přerušování nabíjení v případě zvýšení tlaku.

Typicky je tento typ článků využíván ve výkonových nástrojích, přenosných počítačích a elektrických pohonech. Velmi oblíbeným typem je například typ 18650. Ty mají v průměru 18 mm a postupem času je neustále u těchto článků zvyšována kapacita (v roce 2017 $3,4\text{ Ah}$).

Ačkoliv nejsou tyto články tak prostorově úsporné jako prizmatické měkké články vzhledem ke vzduchovým mezerám, které při jejich spojování vznikají, disponují větší hustotou energie než právě zmíněné prizmatické články. Zatímco prizmatický moderní článek má hustotu energie zhruba 140 Ah/kg , cylindrický dosahuje 248 Ah/kg . Prostorová neúspora se tak v tomto případě stává nevýznamnou vzhledem k potřebě menšího počtu článků v baterii.

Díky těmto vlastnostem se jedná zatím o nejlepší variantu v případě zařízení na elektrický pohon. Cylindrický článek je zobrazen na obrázku 1.10. [7][14]



Obr. 1.10: Cylindrické Li-ion články typu 18650 [Převzato z [7]]



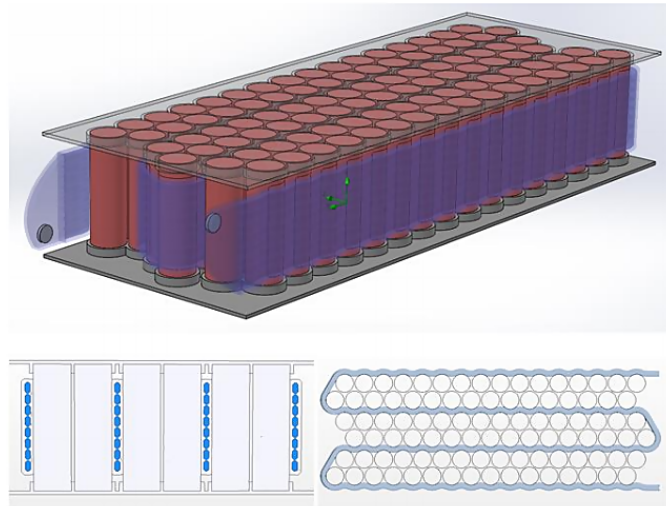
Obr. 1.11: Cylindrické LTO články typu 66160H [Převzato z [9]]

2

Battery Management System

Pojem Battery Management System neboli BMS, definice systému a primární účely BMS jsou rozvedeny ve zdroji [2] ve stejnojmenné kapitole. Na základě toho budou v této práci uvedeny jen nejpodstatnější pojmy a dostupná řešení BMS obvodů se zaměřením na automotive. Každý systém pro správu baterií musí být schopen měřit veličiny zásadní pro vliv na životnost bateriových článků a na základě těchto veličin správně vyhodnotit situaci a adekvátně reagovat. Jedná se například o situaci, kdy je překročeno rozmezí hodnot napětí, teplot nebo proudů, které jsou uvedeny jako vyhovující pro daný typ článků.

V rámci prodloužení životnosti baterií jako celků, které jsou tvořeny sérioparalelními kombinacemi jednotlivých článků za účelem splnění požadavků konkrétních aplikací, se setkáváme s pojmem balancování článků. Balancování je velice podstatná součást každého systému pro správu baterií. Vzhledem k tomu, že aplikace mnohdy vyžadují značně vyšší napětí, než je napětí jednoho článku a stejně tak mnohem vyšší kapacitu, je třeba z akumulátorových článků tvořit bateriové celky. Velmi častým jevem u bateriových článků jsou mírně odlišné vlastnosti, a to i u stejných typů článků. Míra těchto odlišností je jednak důsledek výroby, ale také je ovlivněna okolními podmínkami. Mezi tyto podmínky lze zařadit skladování za různých teplot, odlišné stáří článků a různou úroveň vybití. Právě úroveň vybití článků je nejvýraznějším indikátorem a pokud se u jednotlivých článků v rámci akumulátoru liší, je výrazně snížen potenciál baterie jako zdroje. Pokud je například napětí jednoho z článků na spodní hranici typické pro konkrétní typ elektrochemického zdroje a úroveň vybití se tedy blíží ke 100 %, je nutné celou baterii od obvodu odpojit, ačkoliv zbytek článků by mohl být na maximální kapacitě. Pokud by baterie nebyla odpojena, došlo by k podbití článků a jejich nevratnému poškození. Stejná situace by nastala i v opačném případě (jeden článek zcela nabitý a zbytek na nižší kapacitě). Právě tento problém řeší již zmíněné balancování článků. Příklad baterie jako sestavy sérioparalelních kombinací článků je na obrázku 2.1. [2][15][31]



Obr. 2.1: Ilustrace sérioparalelní kombinace článků v akumulátoru [Převzato z [31]]

2.1 Balancování akumulátorů

Dle základního hlediska je balancování článků rozděleno na:

- aktivní,
- pasivní balancování.

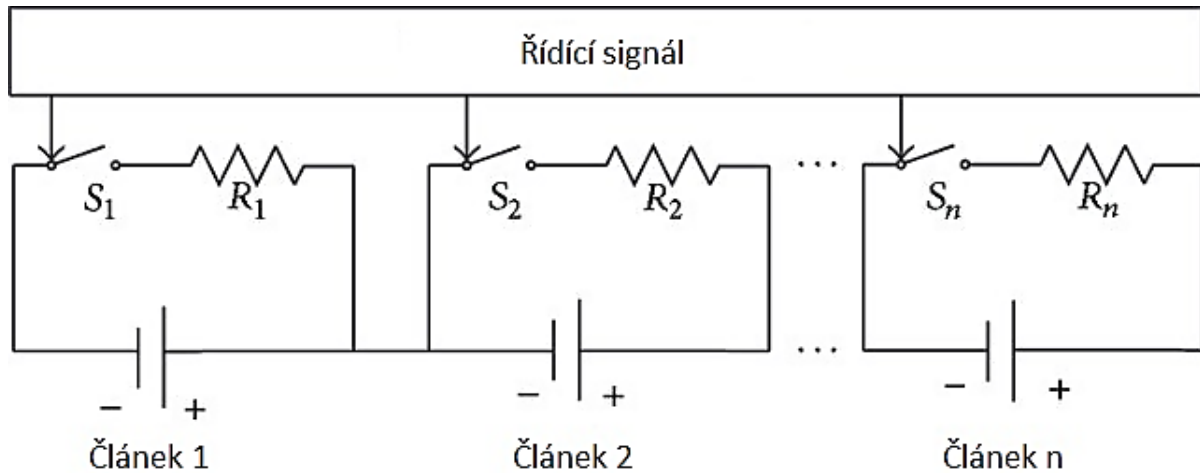
2.1.1 Aktivní balancování

V případě aktivního balancéru dochází k odebrání energie z článků, které disponují nejvyšším stupněm nabití v akumulátoru. Tato energie je následně ukládána do článků, které naopak mají nejnižší kapacitu. Tímto způsobem je omezováno maření energie v rezistorových součástkách, které jsou běžně používány v pasivním balancování. Pro aktivní balancování je však potřeba dalších řídicích obvodů výkonové elektroniky. Tímto je ohrožena spolehlivost a zároveň roste cena balancéru. V případě nižší spolehlivosti dochází k riziku destrukce akumulátoru během poruchy. Aktivní balancování není též vhodné pro obvody, u nichž se vyžaduje jistá úroveň univerzality. [2][15]

2.1.2 Pasivní balancování

Pasivní balancování je jednodušší varianta obsažena ve většině dostupných řešení BMS. Princip tohoto typu balancování je snadno vysvětlitelný na obrázku 2.2.

V případě potřeby odebrání kapacity z článku je sepnut spínač ($S_1 - S_n$). Ten je v praxi zastoupen výkonovými MOSFET tranzistory. Energie je následně mařena ve výkonovém rezistoru ($R_1 - R_n$). O spínači, který má být sepnut nebo rozepnut rozhoduje řídicí signál. Řídicí signál je generován na základě hodnot v registrech k tomu určených. Ačkoliv dochází k maření energie z článků, je tato varianta balancování právě díky své jednoduchosti,



Obr. 2.2: Schéma principu pasivního balancování [Převzato z [33]]

nízkým nákladům na provedení a svojí univerzálností velmi často využívána. S omezením počtu součástek a dalších obvodů potřebných k tomuto typu balancování se též zvyšuje i spolehlivost této metody. [2][15]

2.2 Dostupná řešení bateriového managementu

S přibývajícím poptávkou především pro automotive, roste i repozitář dostupných řešení BMS. Mezi nejdostupnější, nejspolehlivější a s dostatečným množstvím dokumentace jsou řešení od těchto výrobců **NXP/Freescale**, **Renesas (Intesil)** a **Texas Instruments**. V následující části budou vypsáni zástupci řešení BMS od těchto výrobců.

2.2.1 NXP - MC33772B

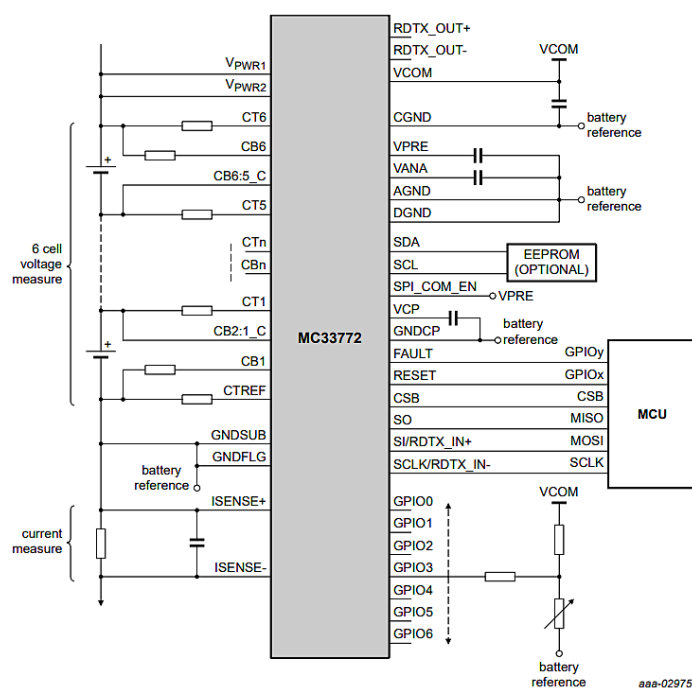
MC33772B je integrovaný obvod určený pro management lithiových baterií od firmy **NXP**. Toto řešení je primárně určeno pro automotive a disponuje ochranou proti přebíjení/podbití článků, schopností balancovat články, GPIO vstupy pro měření teplot, diagnostikou pro ověření správného chodu funkcí BMS a primární komunikací s modulem je zde protokol SPI. Existuje 10 variant tohoto obvodu a každá varianta se liší jak ve složení výše zmíněných funkcí, tak v počtu článků, které je každý obvod schopen monitorovat. Napětí a proud článků jsou přes AD převodníky konvertovány a v číslicové podobě následně přes SPI komunikaci přeneseny jako hodnoty do mikrokontroléru ke zpracování. Většina variant obvodu také podporuje TPS komunikaci a možnost vzájemného propojení daisy chain pro případnou potřebu vrstvení obvodu v rámci rozšíření počtu článků. Ilustrace obvodu z katalogového listu je na obrázku 2.3. Pro zobrazení blokového schématu s vyznačenými signály slouží obrázek 2.4. [16]

Právě počet článků v sérii, který je obvod schopen monitorovat je limitujícím faktorem. Ten je u nejvýkonnější varianty obvodu stanoven na 6 článků. Ačkoliv je toto



Obr. 2.3: Produktový obrázek obvodu MC33772B [Převzato z [16]]

kompensováno zpětnou kompatibilitou se starším typem obvodu (**M33771**), díky čemuž je možno dosáhnout maxima o 14 článků, byl nedostatečný počet článků důvodem, proč nebyl tento obvod vybrán. Integrace obvodu (**M33771**) by přinesla další komplikace při návrhu.



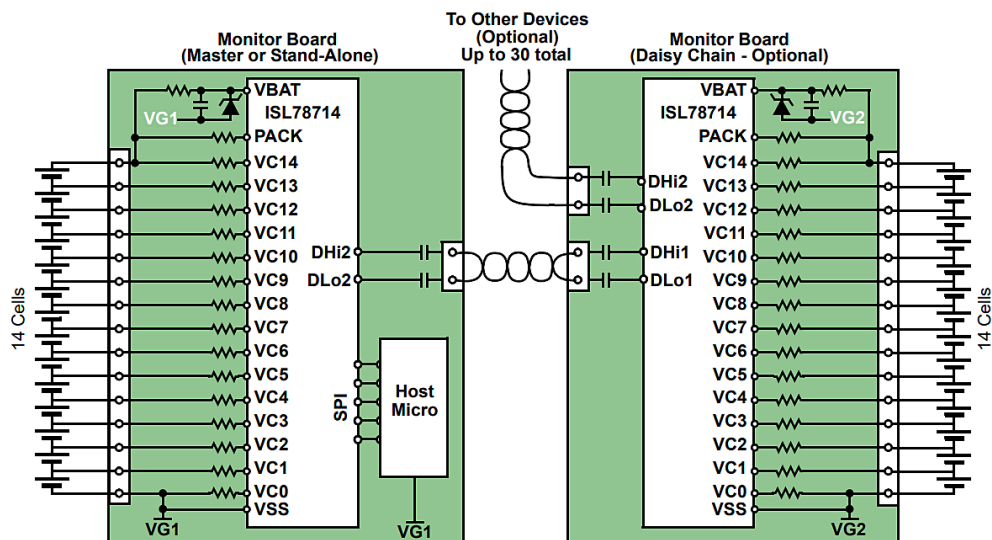
Obr. 2.4: Zjednodušené schéma MC33772B [Převzato z [16]]

2.2.2 RENESAS - ISL78714

Tento obvod z dílen **RENESAS** je dalším dostupným řešením v rámci BMS pro automotive a supervizi Li-ion článků. Je zde podporováno až 14 do série zapojených článků. Jedná se o čtvrtou generaci těchto integrovaných obvodů a počet monitorovaných článků odpovídá schopnostem pouzdra TQFP, ve kterém je obvod dodáván. Obvod je možno v rámci Daisy Chain rozšířit o dalších 29 jednotek a tím počet monitorovaných článků rozšířit až na 420. Kromě integrovaných teplotních senzorů je možné připojit k obvodu až 6 externích a velmi užitečnou funkcí je též automatická detekce pozice měřených článků.

Jednotlivé moduly komunikují s řídicím přes SPI rozhraní, případně transformátorovou vazbou s rychlostí přenosu až 1 Mbit/s stejně jako v předchozím případě. Samozřejmostí je také funkce balancování článků a diagnostika systému pomocí GPIO výstupů. [17][18]

Na obrázku 2.5 je zobrazena typická aplikace obvodu. V tomto případě se jedná o dva moduly spojené do Daisy Chain. Modul vlevo je řídicí (master) a vpravo podřízený (slave). Master přes SPI komunikuje s mikrokontrolérem označeným jako „Host Micro“. Master je dále připojen přes izolovanou komunikaci k dalšímu modulu a ten může být připojen k dalšímu. Tento obvod nebyl shledán jako vhodné řešení z důvodu dokumentace, která byla ze subjektivního hlediska vnímána jako nepřehledná. [17]



Obr. 2.5: Typická aplikace zapojení ISL78714 [Převzato z [17]]

2.2.3 Texas Instruments - bq76PL455A-Q1

Texas Instruments se podobně jako předchozí zástupci může pyšnit řadou BQ. V našem případě konkrétně **bq76PL455A-Q1**. Oproti jiným zástupcům je tento obvod schopen měřit a balancovat až 16 článků. O převod hodnot napětí, proudů a teplot všech kanálů se stará 14-ti bitový AD převodník a nominální doba převodu všech článků je $2,4\text{ ms}$. Dále je v obvodu integrována ochrana proti přepětí/podpětí článků a možnost připojení až 8 externích teplotních senzorů. V tomto případě je komunikace mezi moduly a řídicí jednotkou asynchronní, konkrétně UART. Výhodou je možnost aktivního balancování za pomoci dodatečných obvodů, konkrétně **EMB1428Q/EMB1499Q**. Pro propojení vícera modulů je zde opět možnost zapojení v rámci daisy chain přes kapacitorově izolovanou komunikaci. Tento obvod byl nakonec na základě rozsáhlého popisu ve zdroji [34] a láka-vých specifikací vybrán pro tuto diplomovou práci. Podrobněji bude rozebrán v kapitole zabývající se návrhem obvodu. Zjednodušené funkční schéma obvodu je na obrázku 3.5. [19]

3

Návrh zapojení BMS s obvodem bq76PL455A-Q1

Vzhledem k omezenému počtu měřených článků, které je jeden obvod **bq76PL455A-Q1** schopen spravovat, bude ve většině případů nutné použít více než jeden tento obvod. Spojování dalších obvodů do série je tedy zásadní pro vytvoření univerzální elektroniky. Návrh BMS obvodu je proveden s ohledem na otestování spojení více modulů v rámci jednoho plošného spoje za účelem otestování komunikačních částí. Články byly nerovnoměrně rozděleny do obou obvodů s ohledem na ověření činnosti navrhovaných algoritmů. Jeden obvod **bq76PL455A-Q1** je schopen spravovat až 16 článků s požadavkem na minimální napětí. Toto napětí činí 12 V. Výrobce však uvádí, že minimální počet pro bezproblémový provoz je 6 článků. Rovněž je velmi důrazně doporučeno, aby byly články zapojovány ze spodní strany (první kladná elektroda článku na BAT1). Články jsou rozděleny tak, že spodní modul (master) obsluhuje 14 článků, zatímco vrchní modul článků šest. V následujících sekcích kapitoly budou popsány jednotlivé části obvodu **bq76PL455A-Q1**, doporučená zapojení a komunikační protokoly. [19][20]

3.1 Single Ended komunikace

Single Ended komunikací je označována komunikace vodičů se společným zemněním. V tomto případě jde o komunikaci mezi **bq76PL455A-Q1** a řídicím mikrokontrolérem. Spojení se skládá z komunikačních vodičů UART a vodiče zemního. Součástí zapojení není galvanické oddělení. Ve zdroji [19] je tento typ komunikace označován jako případ s použitím jednoho modulu **bq76PL455A-Q1**. [21]

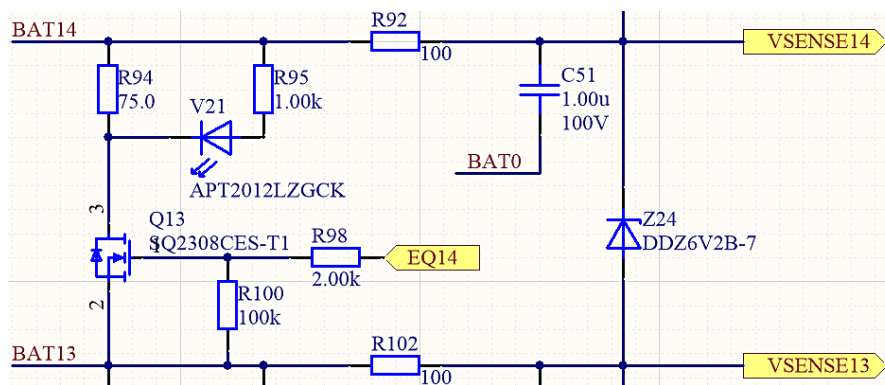
3.2 Daisy Chain komunikace

Obvod **bq76PL455A-Q1** podporuje zapojení do Daisy Chain struktury. Tato struktura spočívá v propojení jednotlivých modulů do série, přičemž není potřeba, aby všechny

moduly komunikovali s řídicím mikrokontrolérem. Tuto úlohu přebírá master, který je jako jediný připojen přímo k mikrokontroléru. Adresování jednotlivých modulů v Daisy Chain struktúře je popsáno v 5.1. [21]

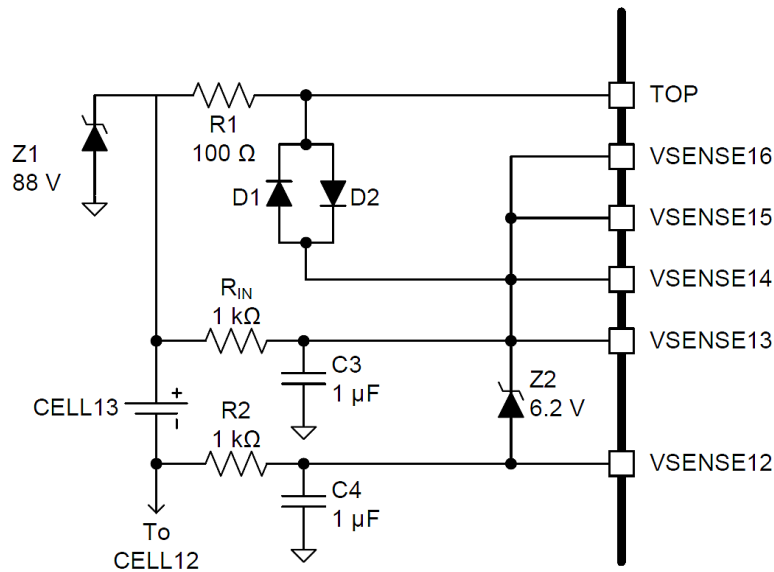
3.3 Vstupní obvod bq76PL455A-Q1

Vstupní částí obvodu je žlutě označená část vlevo se vstupy VSENSE_x a EQ_x na obrázku 3.5 v sekci 3.4. Ke vstupům VSENSE_x je připojena kladná elektroda článku baterie. Pomocí EQ_x je pak řízeno samotné balancování článků. V našem případě, kdy nejsou využity moduly pro možnost případného aktivního balancování, je balancování pasivní. [14][19]



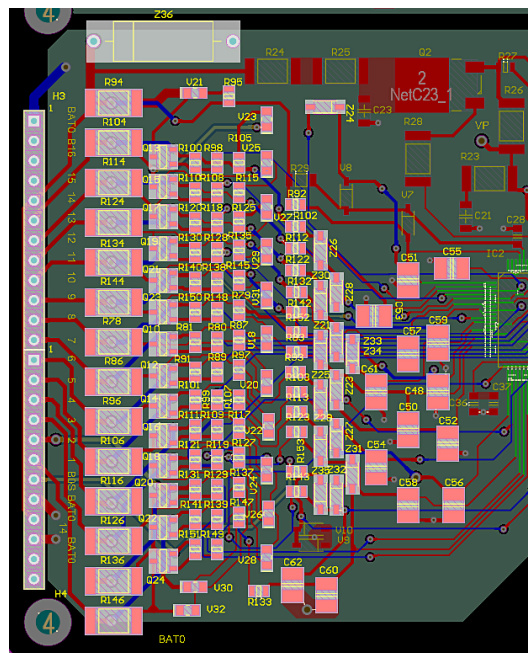
Obr. 3.1: Výřez vstupního obvodu pro filtraci a balancování článků

Na obrázku 3.1 je výřez vstupní části navrhovaného obvodu pro filtraci a balancování. Hlavními částmi tohoto obvodu jsou balancovací vybíjecí rezistor (R94), balancovací FET tranzistor (Q13) a dolní propust (R92 a C51). Rezistor ve filtru má doporučenou hodnotu v rozmezí od 100 Ω do 300 Ω . S vyšší hodnotou tohoto rezistoru stoupá ale úbytek napětí a klesá přesnost měření. Pro kondenzátor ve filtru byla zvolena hodnota 1 μF . Do každé vstupní větve byla přidána signalizační LED dioda s rezistorem (V21 a R95). V případě balancování a sepnutí tranzistoru signálem EQ_x dochází k průtoku proudu balancovacím rezistorem a sepnutí LED diody. LED diody mají tedy informativní charakter o tom, který článek je právě balancován. Mezi výstupy této vstupní části (VSENSE14, VSENSE13 na obrázku 3.1) je zapojena Zenerova dioda. Ta slouží jako přepěťová ochrana a je mezi každým VSENSE_x vstupních obvodů. Napětí těchto Zenerových diod je 6,2 V. Příklad celého zapojení vstupního obvodu se 16 sériově zapojenými články je na obrázku 3.4. Pokud je použito méně než 16 článků stejně jako v případě této diplomové práce, jsou nevyužité VSENSE_x výstupy připojeny na společný potenciál, který je přes antiparalelní spojení diod D1 a D2 propojen s nejvyšším napětím baterie (TOP). Diody D1 a D2 fungují jako přepěťová ochrana a musí být schopny ustát špičkové proudy, které se objeví během případného rozpojení. Jak by mělo zapojení s méně než 16 články v sérii vypadat, popisuje obrázek 3.2. [19][20]

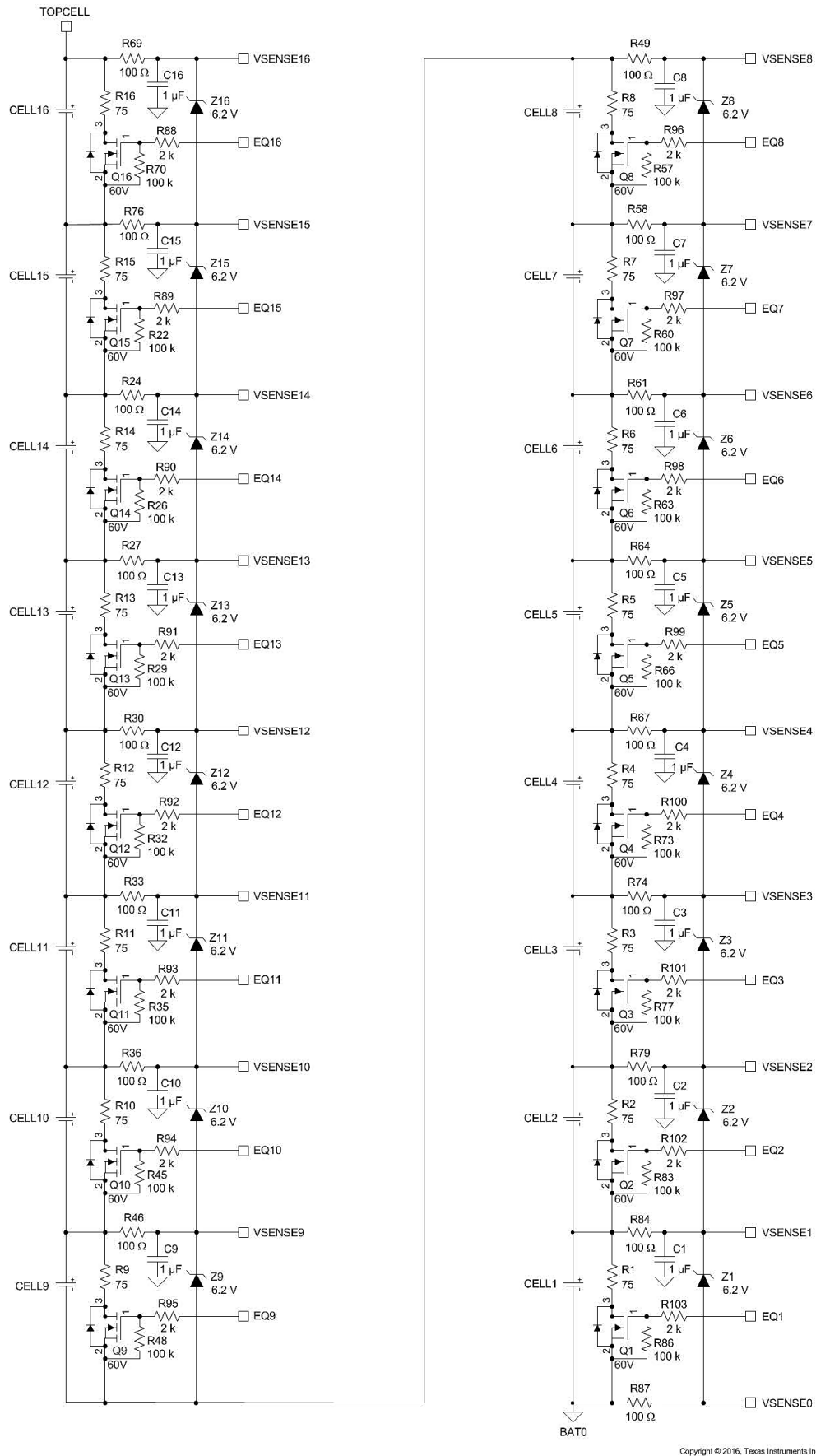


Obr. 3.2: Příklad zapojení vstupního obvodu s méně než 16 články [Převzato z [20]]

Při návrhu je podstatné vybírat ochranné komponenty tak, aby odolaly proudovým špičkám a součtu napětí všech článků v případě poruchy. Hodnota rezistoru na hradle balancovacích tranzistorů musí být dostatečně vysoká, aby došlo k rychlému vybití hradla. Detail vstupní části na desce plošných spojů je na obr. 3.3.



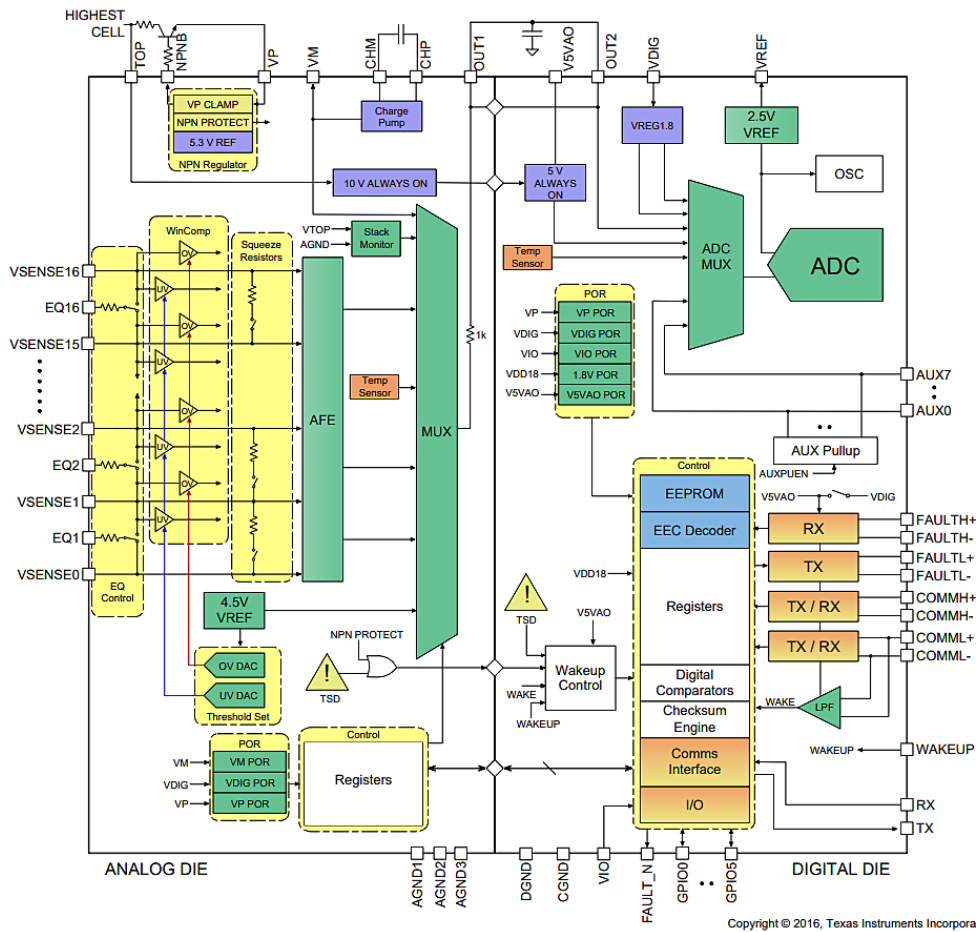
Obr. 3.3: Detail vstupní části master modulu na DPS



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

Obr. 3.4: Příklad zapojení vstupního obvodu pro 16 článků [Převzato z [20]]

3.4 Napájení bq76PL455A-Q1



Obr. 3.5: Zjednodušené funkční schéma obvodu bq76PL455A-Q1 [Převzato z [19]]

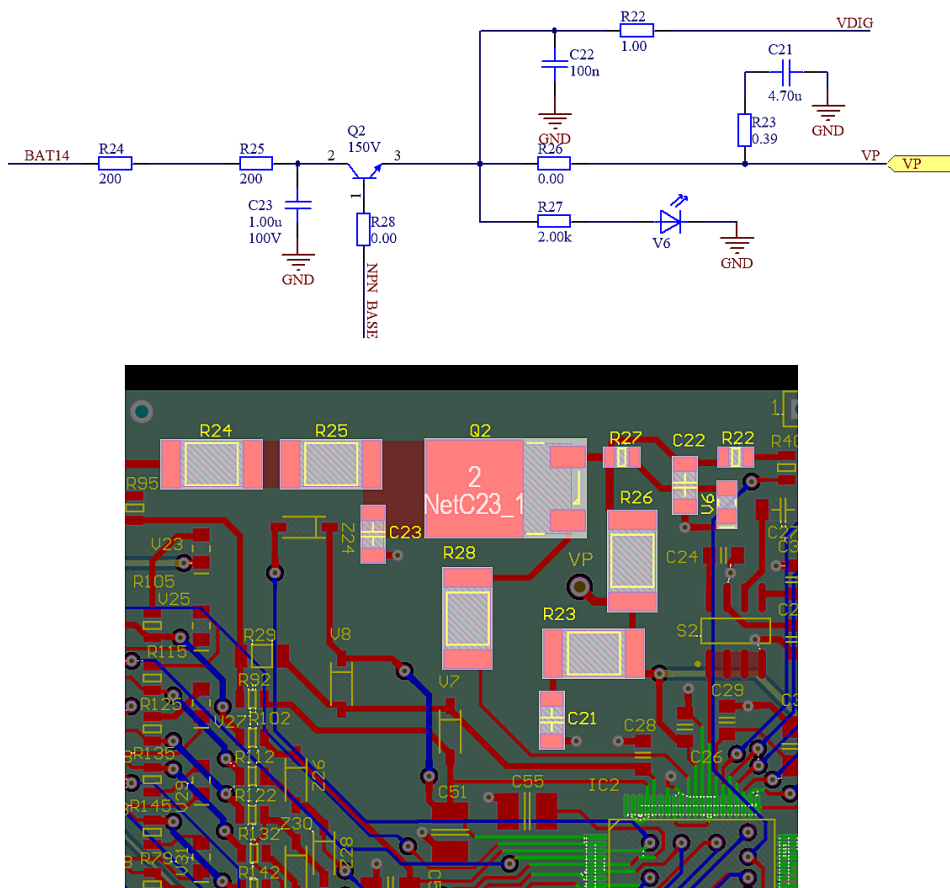
Na obrázku 3.5 je zobrazeno vnitřní blokové schéma obvodu. Obvod je napájen pomocí NPN tranzistoru, na jehož kolektor je přivedeno napětí kladného potenciálu vrchního článku obvodu. To je následně stabilizováno na 5,3 V. Pro správnou funkčnost lineární stabilizace, která je závislá na napětí baterie je potřeba dodržet minimální vstupní napětí. Napětí baterie je ještě regulováno na 10 a 5 V pro potřeby obvodu. Při registraci požadavku na probuzení celého obvodu je pomocí NPNB výše zmíněný tranzistor otevřen. Pin VP slouží jako zpětná vazba regulace. Pro napájení číslicové části obvodu je použit pin VDIG. Ten je přes filtr připojen k pinu VP. Pro obvody sloužící ke komunikaci, GPIO a signalizační výstupní obvody je napětí označené jako VIO. U master modulu je VIO vstup napájen z mikrokontroléru/externího napájení. Pro zbytek modulů platí, že by tento vstup měl být napájen z VP/VDIG pinů. K vytvoření napětí -5 V pro vnitřní obvody je přítomna nábojová pumpa. Výstup této pumpy je označen jako VM. [14][19][20]

Jak již bylo popsáno výše, celý obvod je napájen z článků, které sám též monitoruje a balancuje. Pro napájení se využívá externí NPN tranzistor s nízkým napěťovým úbytkem sloužící ke stabilizaci. Rezistory R163 a R164 na obrázku 3.6 slouží nejen k limitaci proudu

v případě poruchy, ale odebírají také část konstantního výkonu, která se na tranzistoru objevuje během chodu. Kapacitor C40 v kombinaci s rezistory tvoří dolnoproputsní filtr. K výpočtu potřebné rezistance slouží rovnice 3.1

$$R_{MAX} = \frac{(U_{MODULE(min)} - (VP_{MAX} + U_{CE(SAT)}))}{31mA + I_{LOAD}} \quad [\Omega; V, A], \quad (3.1)$$

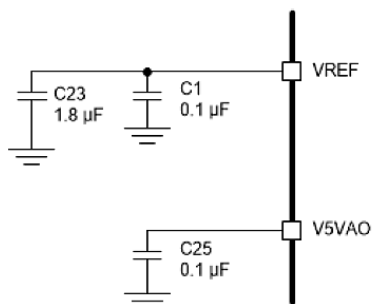
kde $U_{CE(SAT)}$ je minimální napětí U_{CE} při spínacím U_{BE} tranzistoru. $31mA$ je hodnota maximálního proudu z datasheetu **bq76PL455A-Q1** a I_{LOAD} je očekávaný proud z okolních obvodů pracujících jako zátěž na VP pinu. Schéma zapojení napájecího obvodu, které bylo právě popisováno je k vidění na obrázku 3.6. Je nutné brát v potaz i ztrátové teplo, které se na rezistorech objeví, jelikož právě na těchto balancovacích rezistorech je mařena energie z akumulátorových článků ve chvíli, kdy je balancování aktivní. Odhadem se bude ztrátová energie pohybovat do $250mW$ na každém z vybíjecích rezistorů. Důležité je brát zřetel i na maximální napětí balancovacích rezistorů. Pro rovnoměrné rozložení tepla je doporučeno paralelní spojení těchto balancovacích rezistorů. [19][20]



Obr. 3.6: Použité schéma lineárního napájení obvodu s NPN tranzistorem (nahore) a detail obvodu na DPS (dole)

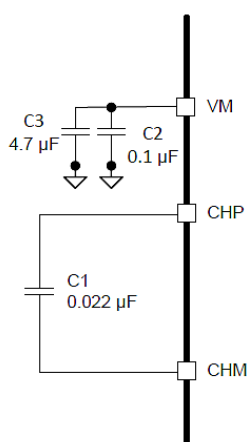
Doporučené zapojení napětí V5VAO a VREF jsou zobrazeny na obrázku 3.7, jsou k němu připojeny odrušovací kondenzátory. Stejný princip platí pro napětí VREF. Obě tato napětí slouží pro napájení vnitřních obvodů citlivých na jakoukoliv změnu napětí,

kteřá by mohla ovlivnit jejich správnou funkci a přesnost měření. Proto je doporučeno osazovat tyto kondenzátory co nejbližší k IO a zároveň pomocí těchto zdrojů nenapájet další obvody, jako je například mikrokontrolér. Pro napájení dalších zařízení je nutno tedy používat napětí z akumulátoru spolu s externími regulátory napětí a případnými spínacími prvky pro snížení odběru při nečinnosti. [20]



Obr. 3.7: Doporučené zapojení externích kondenzátorů pro V5VAO a VREF |Převzato z [20]|

Na obrázku 3.8 je zobrazeno doporučené zapojení pro nábojovou pumpu generující napětí $-5V$. Je potřeba externí kapacitor (C1) mezi piny CHP a CHM. Ten je použit pro přenos náboje pro zmíněnou nábojovou pumpu. K tomuto celku se řadí též pin VM, ke kterému připojíme kapacitory C2 a C3.



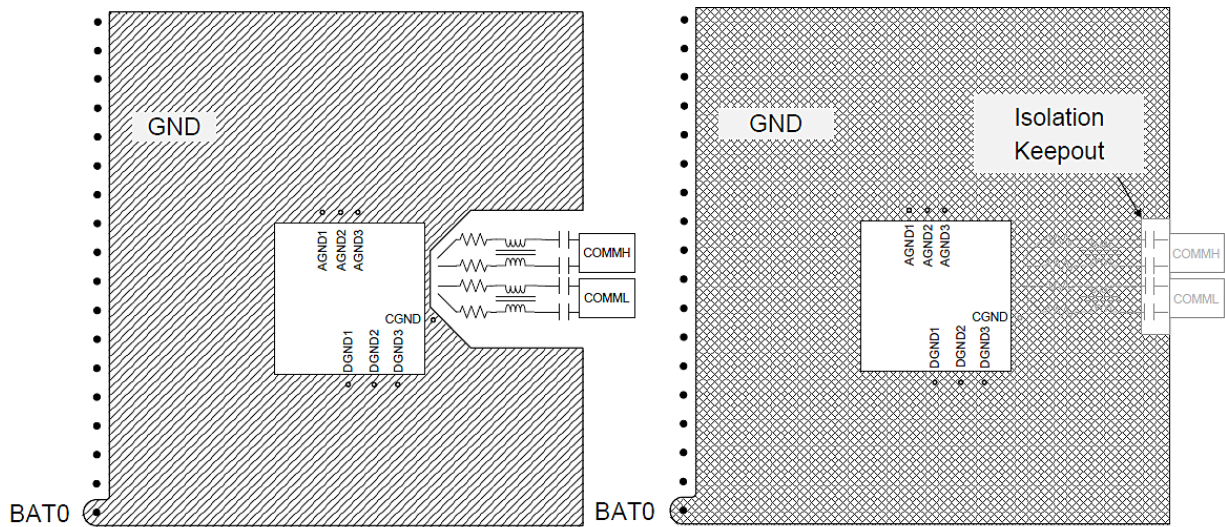
Obr. 3.8: Doporučené zapojení externích kondenzátorů pro nábojovou pumpu |Převzato z [20]|

3.5 Zemnění pro bq76PL455A-Q1

Vzhledem k tomu, že se v obvodu objevuje několik pinů představujících zemnění včetně analogové a digitální země, je třeba dodržet určitá opatření pro bezproblémovou funkci obvodu. Součástí obvodu jsou tyto zemnící piny:

- **AGND1** - sekce napájení, zarušená zem,

- **AGND2** - zem pro výstup,
- **AGND3** - zem pro vstup AD převodníku,
- **DGND1, DGND2, DGND3** - digitální zem,
- **CGND** - digitální zemi pro komunikaci. [20]



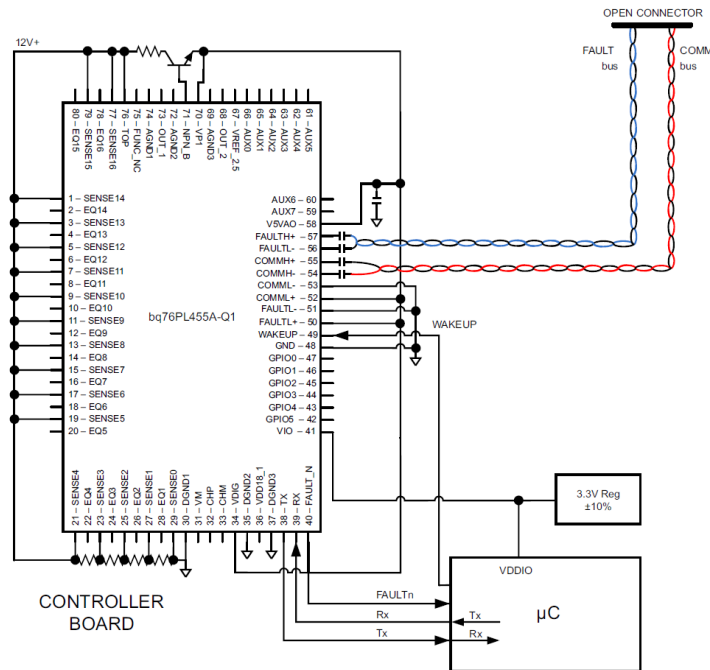
Obr. 3.9: Zjednodušené rozvržení zemnění na DPS (vrchní a spodní vrstva vlevo, střední vrstvy vpravo) [Převzato z [19]]

Z doporučení obsaženého v [19] (obr. 3.9) vyplývá, že je doporučeno, aby v DPS byla jedna neporušená zemnicí vrstva (GND). Ta je přes silnou stopu kvůli významnému rozdílu potenciálů spojena se zápornou elektrodou nejnižšího článku v sérii (BAT0). Do této neporušené zemnicí vrstvy jsou jednotlivě připojena veškerá zemnění. COMMH a COMML jsou piny sloužící pro připojení dalších modulů a kolem vodičů a odrušovacích součástek je důrazně doporučeno vytvořit izolační mezeru bez potenciálu. Ta by měla obklopotvat i komunikační kondenzátory ve středových vrstvách. Je důležité si uvědomit, že v případě této práce byly použity dva obvody na jedné desce plošných spojů. Proto nelze použít jednu zemnicí vrstvu pro oba obvody, jelikož rozdíl potenciálů je významný. Je tedy potřeba pro každý obvod **bq76PL455A-Q1** vytvářet zemnění zvlášť. Taktéž v doporučení pro návrh stojí, že je ideální použít plošný spoj o čtyřech a více vrstvách. Rozdělené zemnicí plochy jsou dobře viditelné v příloze A.8. [19][20]

3.6 Provozní režimy obvodu bq76PL455A-Q1

Obvod **bq76PL455A-Q1** může být navržen v rámci několika scénářů použití. Jedním z těchto scénářů je komunikační můstek. Tento můstek zjednodušeně slouží jako rozhraní mezi řídicím mikrokontrolérem nebo řídicí jednotkou a následujícími moduly. Namísto

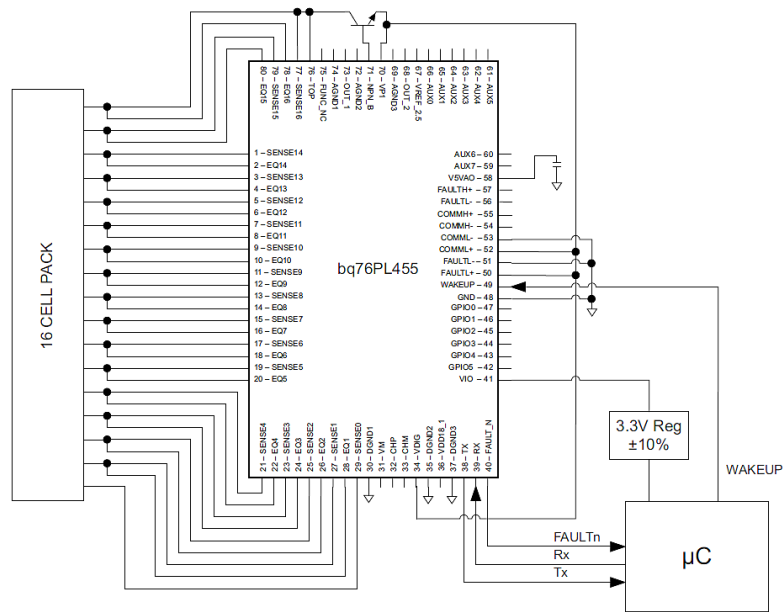
článků jsou mezi vstupy VSENSE_x připojeny rezistory o hodnotě 100 kΩ. Modul v tomto zapojení představuje master. Vstupní napájecí napětí pro tento můstek je 12 - 20 V. Pro možnost připojení vyššího než uvedeného napětí je třeba připojit další rezistory mezi vstupy VSENSE_x ve vzestupném pořadí. [21]



Obr. 3.10: Zjednodušené zapojení bq76PL455A-Q1 jako komunikačního můstku [Převzato z [21]]

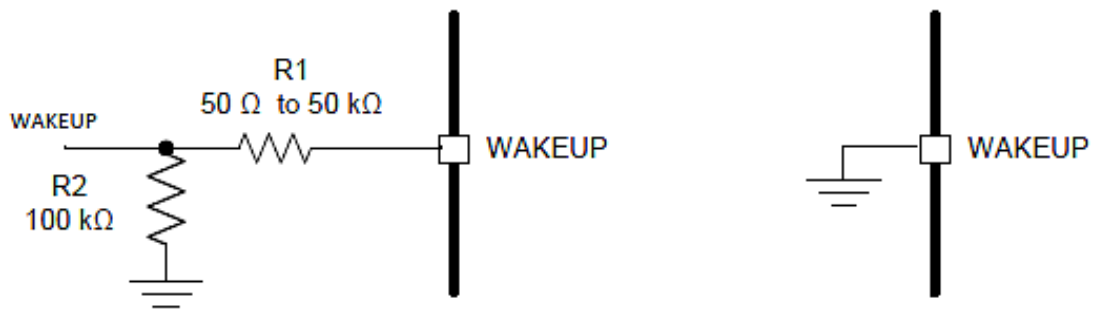
Dalším scénářem pro zapojení obvodu je Single Ended. Toto zapojení je použito v případě, že chceme obvod pouze s jedním **bq76PL455A-Q1**. Od zapojení s Daisy Chain se liší pouze v přizpůsobení komunikačních vstupů a výstupů. COMMH+ a COMMH- vstupy jsou v tomto případě nevyužity, jelikož se jedná o první modul v řadě (zde neuvažujeme použití komunikačního můstku). Tyto vstupy mohou zůstat nepřipojeny, pokud nejsou použity, stejně tak piny FAULTH+ a FAULTH-. Tyto piny slouží k signalizaci chyb při komunikaci. COMML+ a COMML- opět připojíme k podřazenému modulu v případě použití Daisy Chain architektury. Pokud zůstaneme u Single Ended zapojení, pin COMML- připojíme přes pull-down rezistor k zemi a COMML+ přes pull-up rezistor k V5VAO. TX a RX jsou připojeny k VIO pull-up rezistorem. Pokud by zůstaly tyto vodiče „viset“, docházelo by k chybné registraci příkazů. Pro ilustraci slouží obrázek 3.11. [19][21]

Rozdíl v zapojení oproti předchozímu nastává především v části napájení. Ten spočívá v pinu VIO. Tento pin napájí komunikační vodiče pomocí mikrokontroléru a je připojen k VP/VDIG všech modulů kromě modulu základního (master). Zatímco GPIOx piny u Single Ended modulu (případně master v Daisy Chain architektuře) jsou připojeny k GPIO mikrokontroléru, v dalších modulech nejsou potřeba a je nutné připojit pull-down rezistor o hodnotě 100 kΩ pro správnou funkci. Další rozdíl v zapojení se týká pinu WAKEUP (obr. 3.12). Tento pin slouží k probouzení obvodu pomocí mikrokontroléru



Obr. 3.11: Zjednodušené zapojení bq76PL455A-Q1 jako Single Ended [Převzato z [21]]

v případě nutnosti měření nebo balancování obvodu. [19][20][21]

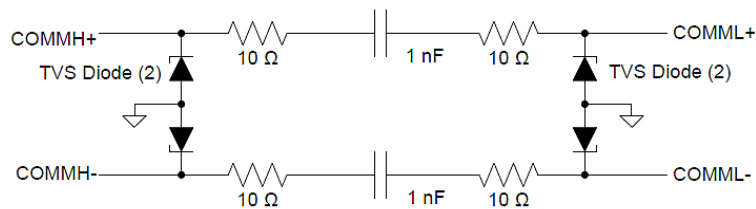


Obr. 3.12: Zakončení pinu WAKEUP u řídicího modulu (vlevo) a podřazených modulů (vpravo) [Převzato z [20]]

3.7 Komunikační část obvodu bq76PL455A-Q1

Komunikační část obvodu se dělí na několik variant. První varianta je zapojení pro případ prvního modulu v pořadí (master) a druhá varianta zapojení je použitelná pro další moduly v pořadí zapojení Daisy Chain. Obě varianty se liší především v zakončení komunikačních pinů.

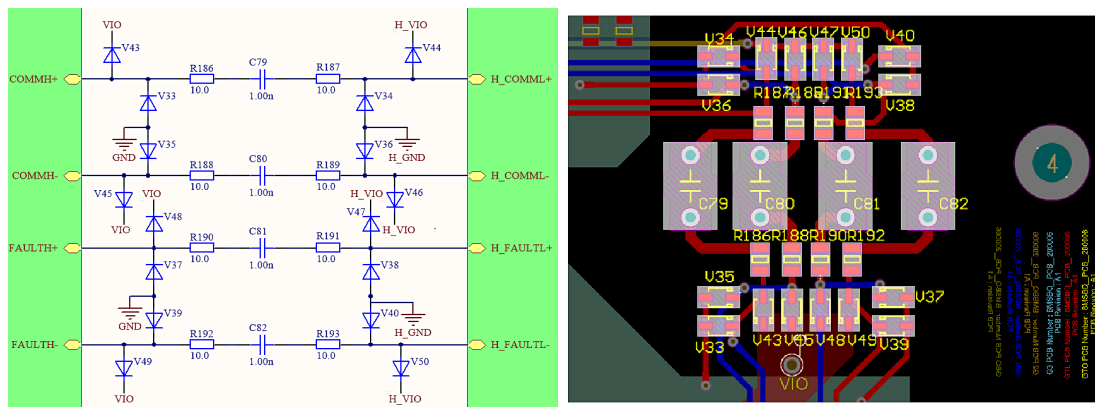
Jak již bylo uvedeno v 3.6, pro modul plnící funkci master je pin COMML- připojen přes 10 k Ω pull-down rezistor k číslkové zemi a COMML+ přes pull-up rezistor o totožné hodnotě k pinu V5VAO. Pin FAULT_N je připojen přes 50 k Ω pull-down rezistor k zemi, jelikož je potřeba, aby obvod generoval chybové hlášky v případě, že napětí VIO není přítomno. Právě signál z pinu FAULT_N informuje uživatele o neočekávaném vypnutí obvodu. Na obrázku 3.13 je zobrazeno schéma pro komunikační spojení dvou modulů v rámci jedné desky. [21]



Obr. 3.13: Doporučené schéma komunikační části mezi dvěma moduly v rámci jedné DPS

[Převzato z [21]]

Zde si zaslouží pozornost ochranné diody a odrušovací kondenzátory. V projektu byly namísto doporučených transilových použity klasické diody, které slouží jako ochranný prvek pro každý vodič. Diody jsou zapojeny mezi komunikační vodiče a zem, stejně tak mezi komunikační vodiče a napájení komunikační části. Jako odrušovací kondenzátory byly zvoleny kondenzátory X1Y2. Na obrázku 3.14 je návrh schématu (vlevo) spolu s finálním návrhem osazení (vpravo). Komponenty přidružené k dalšímu modulu (vyšší v pořadí) jsou označeny předponou „H”.



Obr. 3.14: Schéma komunikační části (vlevo) a detail na DPS (vpravo)

První modul v pořadí komunikuje s řídicí jednotkou (v našem případě mikrokontrolérem) pomocí komunikace UART piny RX a TX (viz obr. 3.11). UART je sériová asynchronní komunikace. Výhodou této komunikace je, že jsou potřeba pouze dva vodiče pro plně duplexní přenos. Rychlost komunikace, neboli počet bitů za sekundu (baud rate), se pohybuje od 2400 bitů za sekundu.

3.8 Řídicí modul

Řídicím modulem v obvodu se rozumí jednotka, která obstarává veškerou logiku funkce. V paměti řídicího modulu je obsažen kód vykonávající příslušné algoritmy. Součástí těchto algoritmů je sběr dat, jejich vyhodnocení a aritmeticko-logické operace s nimi. Řídicí modul lze považovat za „mozek“ celého projektu.

Jako řídicí mikrokontrolér byl zvolen modul od Texas Instruments **TM4C123GH6PM**. Požadavkem byla schopnost komunikace UART, která je hlavním způsobem komunikace pro zvolené řešení BMS. Mezi požadavky také patřila možnost CAN komunikace. Na desku plošných spojů byl integrován CAN budič, aby obvod byl dále schopen komunikovat s dalšími perifériemi testovaného vozidla. Zmíněný mikrokontrolér je poháněn procesorem ARM Cortex M4. Disponuje osmi I/O pro UART komunikaci, I2C, SPI a dvěma CAN moduly.



Obr. 3.15: Mikrokontrolér TM4C123GH6PM od TI |Převzato z [19]|

Obecně jsou mikrokontroléry od **Texas Instruments (TI)** této řady označovány jako **TIVA C Series**. Jejich předností je velmi nízká spotřeba, což je žádoucí v případě použití spolu se zařízením napájeným bateriemi. ARM Cortex M4 se pyšní kompatibilitou jak s 8 a 16 bitovými instrukcemi, tak se 32 bitovými. M4 rozšiřuje předchozí M3 o rozšíření pro digitální zpracování signálu (DPS), stejně tak jako SIMD instrukce. SIMD instrukce

umožňují provést čtyři 8 bitové nebo dvě 16 bitové operace v jednom cyklu a tím efektivněji provádět aritmetické operace ve větších datových polích. Mikrokontroléry řady **TIVA C** umožňují též operace s pohyblivou desetinnou čárkou. Podpora pohyblivé desetinné čárky ohromně zjednodušuje implementaci a programování rutin.

Řada **TIVA C** vychází z předchůdců MSP a C2000 taktěž od TI. Kromě již zmíněného snížení spotřeby došlo i k zaměření na některé části obvodů, zejména mixed-signal a paměťové struktury. Výsledkem vývoje těchto mikrokontrolérů je rychlý 12 bitový AD převodník. AD převodníky jsou přímo na čipu mikrokontroléru. Jsou konkrétně dva a je možné převádět až 24 nezávislých vstupů. Pro zvýšení přesnosti je možné použít externí napětí jako referenci. Samozřejmostí je také DMA pro urychlení porovnání a ukládání dat do paměti. Na samém čipu jsou také tři analogové komparátory s programovatelnou referencí, které spolu s digitálními komparátory umožňují uvolnění fronty příchozích hodnot z AD převodníku a tím vytížení procesoru za účelem zaměření na procesy v reálném čase.

Paměť u této řady je vyráběna 65 nm technologií. Díky tomu je možné koncentrovat větší množství paměti na stejný prostor. 256 KB flash paměť obsažena v těchto mikrokontrolérech má minimální počet přepsání stanoven na 100 000 cyklů. Další vysoce spolehlivá flash paměť pro uživatelský kód je dostupná v malé ROM maskovací paměti na čipu v rámci softwarových ovladačů TivaWare. TivaWare je software obsahující knihovny pro periférie, systémové programovací rutiny jakými jsou například CRC algoritmy a šifrovací standardy. V mikrokontrolérech této řady je obsažena také 2 KB EEPROM pro uchování dlouhodobě používaných proměnných, které mohou být potřeba i po případném výpadku napájení. Každý segment této paměti může být přemazán až 500 000 krát.

Na základě 65 nm technologie byla snížena i spotřeba mikrokontrolérů. Není třeba omezení výkonu za účelem snížení spotřeby. Hradlovou logikou lze nastavit hodinové a napájecí domény pro požadovanou aplikaci. Pro **TIVA C** mikrokontroléry existují stavy, jakými jsou sleep, deep sleep a hibernace právě v rámci snižování spotřeby, pokud zařízení napájené baterií není zrovna využíváno a je potřeba uchovat pouze základní funkcionality. V režimu hibernace je odpojen celý čip kromě hibernačního bloku. To znamená, že je funkční pouze část obvodu sloužící k probuzení zařízení zpět do stavu, ve kterém se nacházelo v době usnutí. V hibernačním bloku se nachází 32 kHz oscilátor, RTC, monitor baterie a šestnáct 32 bitových slov SRAM pro zálohu baterie. V hibernaci má celý mikrokontrolér spotřebu 1.6 μA . Z hibernace může být mikrokontrolér probuzen například pomocí RTC nebo externím budícím signálem. Pomocí RTC lze nastavit probouzení v rámci minut nebo dokonce dnů. Stav všech GPIO může být zachován, aby nedocházelo k neočekávaným změnám během hibernace, jelikož po probuzení z hibernace prochází mikrokontrolér resetem a všechna nastavení je třeba uložit do paměti.

Na obrázku 3.16 je zobrazen přehled low power režimů mikrokontroléru. Nejdůležitějšími parametry jsou v případě spotřeby proudu I_{DD} . Lze konstatovat, že při běžném režimu je proudový odběr více než šestkrát větší oproti nejméně úspornému sleep módu. Proudové hodnoty jsou měřeny při průběhu programu uloženého v paměti FLASH.

Nejmenší odběr pak má režim hibernace bez možnosti probuzení pomocí RTC. Zde je obvod napájen ze 3 V V_{BAT} . Z tohoto stavu je pak možné probudit zařízení pouze signálem RESET nebo externím signálem do GPIO. [24]

Mode →	Run Mode	Sleep Mode	Deep Sleep Mode	Hibernate (VDD30N)	Hibernate (RTC)	Hibernate (no RTC)
Parameter ↓						
I_{DD}	30 mA [#]	4.5 mA	600 μ A [*]	5 μ A	1.7 μ A	1.6 μ A
V_{DD}	3.3 V	3.3 V	3.3 V	3.3 V (for GPIO state ret)	0 V	0 V
V_{BAT}	N/A	N/A	N/A	3 V	3 V	3 V
System Clock	80 MHz with PLL	16 MHz no PLL	30 kHz	Off	Off	Off
Core	Powered On	Powered On	Powered On	Off	Off	Off
	Clocked	Not Clocked	Not Clocked	Not Clocked	Not Clocked	Not Clocked
Peripherals	All Off	All Off	All Off	All Off	All Off	All Off

Obr. 3.16: Přehled low power režimů pro mikrokontroléry řady TIVA C |Převzato z [24]|

Pro případné potřeby řídicího modulu bylo na desku plošných spojů přidáno pájivé pole s možností přidání dvou integrovaných obvodů v pouzdře SOIC-20. Pole by mělo sloužit pro přídavné měřicí obvody s operačními zesilovači.

4

Pravidla Formula Student

Formula Student je známá soutěž, ve které se účastní studentské týmy, které konstruují vozy a poté se s nimi kvalifikují na závodních okruzích napříč Evropou a Spojenými státy americkými. V roce 2010 přibyla do této soutěže i kategorie E (Electric), jejíž disciplínou jsou formule na elektrický pohon. Počátek těchto závodů se datuje až k roku 1980 a je spojen s univerzitou v Austin, Texas. Každé vozidlo je testováno v různých disciplínách, přičemž jsou získávány body za výkony v nich. Tyto disciplíny jsou:

- statické,
- dynamické.

Západočeská univerzita v Plzni je již několik let pravidelným a úspěšným účastníkem této soutěže v kategorii spalovacích motorů. V roce 2019 se tým Západočeské univerzity (UWB) umístil v soutěži Formula Student Italy na 6. místě se 709,964 body a na stejné pozici tentýž rok ve Formula Student Czech. Momentálně se usilovně pracuje na tom, aby mohl být závodní vůz v budoucnu uveden i v kategorii Electric. Foto závodního vozu z události Formula Student Italy 2019 je na obrázku 4.1. [32]

Jako každá soutěž má i tato množství pravidel a požadavků, které je třeba splnit před tím, než bude vozidlo účastischné. Převážná většina těchto pravidel je zaměřena na hardware. V rámci této soutěže je zároveň nutno dodržet pravidla týkající se softwaru, konkrétně teplot akumulátoru, napětí článků a způsobu měření veličin. Aby tento projekt mohl být potenciálně použit v rámci této soutěže, je potřeba software přizpůsobit jejím pravidlům. V nadcházející části budou vypsána některá pravidla orientující se čistě na software a způsoby jejich splnění.

4.1 Teplota akumulátoru

Kritické body akumulátoru musí být kontinuálně měřeny, aby bylo zajištěno, že maximální teplota nepřesáhne $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, pokud dokumentace článků neuvádí nižší. Obvod **bq76PL455A-Q1** disponuje jednak měřením teploty interních částí obvodu (analogové a digitální), tak i měřením teploty pomocí AUX vstupů. Pro testování jsou v Test Control registru obsaženy bity, které umožňují uživateli simulovat přehřátí systému a následně vypnout celé zařízení. Stejně tak může uživatel nastavit i měřicí periodu, s jakou budou teploty získávány.

Pro měření AUX vstupů je potřeba zahrnout příslušné vstupy při volbě měřených kanálů (viz 5.2). Kalibrace probíhá obdobně jako u AD převodníku. Z hodnot získaných pomocí rovnic 5.1 a 5.2 spočteme rovnicí 4.1.

$$AOC_n = \frac{(U_{INn} - (\frac{1}{m}) * U_{OUTn})}{\frac{5}{2^{16}}} \quad [-] \quad (4.1)$$

AOC_n je korekční hodnota konkrétního AUX vstupu, která je poté zapsána do šestnáctibitového registru AXnOFFSET. U každého AUX kanálu je možné nastavit hodnotu přepětí a podpětí, při jejichž překročení dojde k nastavení příznaku chyby. Takto je regulováno měření teploty článků u každého modulu. Navzorkování těchto kanálů a odeslání hodnot řídicímu mikrokontroléru je v rukou uživatele. V případě tohoto projektu jsou hodnoty vypisovány za hodnotami napětí článků. [14][27]

4.2 Napětí článků

Bateriový management musí neustále měřit napětí všech článků s pevnou periodou pro rovnoměrné rozdělení měřících bodů v čase. Popis měření napětí na člancích a zároveň i splnění toho pravidla je popsáno v sekci 5.2. [27]

4.3 Naměřené hodnoty

BMS musí být schopno zobrazovat naměřené hodnoty na terminálu připojeného počítače. Toto pravidlo je splněno tak, že řídicí mikrokontrolér po přijetí naměřených data přeposílá přes komunikační port do počítače pomocí UART0. Data mohou být následně zobrazena na terminálu. [27]

4.4 Pravidla pro systém správy akumulátorů (BMS)

V této sekci jsou vypsána všechna pravidla jakkoliv zahrnující BMS, který je též označován jako AMS (Accumulator Management System).

- **EV 5.8.1** – Každý akumulátor v trakčním systému musí být monitorován BMS, kdykoliv je aktivní nízkonapěťový systém nebo akumulátor nabíjen.
- **EV 5.8.2** – BMS musí být schopen kontinuálně měřit napětí všech článků, proud trakčního systému, teploty kritických článků v zapojení, teploty u alespoň 30 % článků v případě použití akumulátoru na bázi lithia s rovnoměrně rozdělenými body měření.
- **EV 5.8.3** – Teplota článku musí být měřena na záporné elektrodě a měřící senzor musí být v bezprostředním kontaktu nebo méně než 10 mm od elektrody v případě vysokého proudu. Je možné měřit více článků jedním senzorem v případě splnění požadavku všemi měřenými články daným senzorem.
- **EV 5.8.4** – Maximální teplota článku je 60 °C, pokud není v dokumentaci výrobce uvedena nižší.
- **EV 5.8.5** – Pořadatel může poskytnout nezávislé měřící zařízení během inspekce akumulátoru. Zařízení musí být uloženo na záporné elektrodě nejteplejšího článku ve vzdálenosti nižší než 30 mm.
- **EV 5.8.6** – BMS musí být schopen vypnout trakční systém pomocí obvodu sloužícího k nouzovému odpojení v případě kritického překročení hodnoty proudu, teploty nebo napětí. Hodnoty jsou uvedeny v dokumentaci článků od výrobce. K nouzovému odpojení dochází při překročení na dobu delší než 500 ms pro proud a napětí. V případě teploty dochází k nouzovému odpojení při překročení hodnot na dobu delší než 1 s.
- **EV 5.8.7** – Vstupy měřeného napětí článků, teplot a napájecího napětí decentralizovaných podřízených BMS mohou být pod maximálním napětím trakčního systému, pokud jsou tyto hodnoty prokázány výpočty v příslušném formuláři a vstupní napětí je zvoleno rozumně.
- **EV 5.8.8** – V případě nouzového odpojení musí být rozsvíceno červené indikační světlo označené písmeny „AMS”. Toto světlo musí být dobře viditelné z vnitřní i vnější strany kokpitu jezdce i během přímého slunečního osvětlení.
- **EV 5.8.9** – BMS signály jsou označeny jako „System Critical Signals”.
- **EV 5.8.10** – Musí být umožněno individuálně odpojit senzor proudu, teploty i vodiče pro měření napětí během technické inspekce, pokud je vodič použit.
- **EV 5.8.11** – BMS musí být schopno číst a zobrazit všechny měřené veličiny podle pravidla EV 5.8.2 po připojení přenosného počítače. [27]

5

Návrh softwaru pro bq76PL455A-Q1

5.1 Komunikace řídicího modulu s bq76PL455A-Q1

Tato sekce se bude věnovat praktické komunikaci k řízení obvodu pro BMS použitého v tomto projektu. Obvod se může nacházet ve třech napájecích stavech:

- **SHUTDOWN** – neboli sleep mód. V tomto režimu se obvod nachází v případě delší neaktivity, aby byla prodloužena životnost baterie na jedno nabití.
- **IDLE** – defaultní režim. Zařízení v tomto režimu je probuzeno a připraveno pro příjem instrukcí, stejně tak k jejich vykonání.
- **ACTIVE** – režim s nejvyšší spotřebou. Tento režim je aktivní ve chvíli komunikace. Jeho spotřeba by se dala popsat jako součet spotřeby v režimu IDLE a komunikační aktivity.

V režimu SHUTDOWN je zařízení vypnuté a monitoring stavu baterie je pozastaven. Pro probuzení zařízení je potřeba příjem signálu o hodnotě logická 1 do pinu WAKEUP, případně stejnojmenné instrukce do komunikačního pinu. V tomto režimu jsou aktivní pouze vnitřní napájecí nízkospotřebové regulátory (viz 3.4). Aby se obvod do tohoto režimu opět navrátil, je potřeba odebrat zdroje napájení VP a VDIG spolu se zdroji napětí pro AUX piny. V momentě odebrání napájení pro VIO pin po dobu delší než 100 ms dojde k přechodu obvodu do režimu SHUTDOWN. Nutností je samozřejmě nízká logická úroveň signálu signálu na pinu WAKEUP, ačkoliv tento pin zařízení do tohoto režimu neuvede. Pokud při uvádění zařízení do SHUTDOWN režimu zůstane logický signál pinu WAKEUP ve vysoké úrovni, dojde k cyklickému vypínání a zapínání obvodu. Pokud není stav tohoto pinu definovaný a pin zůstane "ve vzduchu", chování systému bude nepředvídatelné. Tyto případy nejsou pro obvod destruktivní, nicméně funkce obvodu nebude správná. Po přechodu do SHUTDOWN režimu by mělo okamžitě dojít k vypnutí VP a VDIG. Odejmutím napětí z těchto pinů by mělo dojít taktéž k přechodu do tohoto režimu.

Pro shrnutí je postup pro přivedení zařízení do SHUTDOWN režimu v následujících případech:

- uživatel zadá příkaz SHUTDOWN zapsáním do registru DEV_CTRL[PWRDN] logickou 1 a mezitím je na pinu WAKEUP logická 0.
- Dovršením časovače v registru CTO[COMM_PD_PER]. To může nastat v případě absence validních rámců na příjmu ve stanovené periodě nebo dovršením časovače neohledně na validitu rámců při zapsání logické 1 do registru TSTCONFIG[CCNT_RST_OFF].
- Jeden ze dvou teplotních senzorů zaregistroval příliš vysokou teplotu (každý z těchto senzorů pracuje separátně).
- Napětí na pinu VIO je pod mezní minimální hodnotu po dobu delší než 57 ms (typicky).
- Napětí na pinu V5VAO je pod minimální hladinou po dobu stanoveného časového intervalu (viz dokumentace obvodu).
- Interní VP regulátor je zapnutý a pokouší se řídit NPNB signál lineárního regulátoru, ale napětí na VP zůstává pod minimální hladinou pro VP po dobu delší než 57 ms (typicky).

Vysoká úroveň na pinu WAKEUP přivede hlavní modul do stavu IDLE a v případě užití více modulů a přivedení napájení na pin VIO (napájení komunikačních kondenzátorů) i další moduly v řadě. Zařízení je v tomto stavu připraveno komunikovat. Sekvence spuštění zařízení je následovná:

1. Sepnutí externího NPN regulátoru. Na pinech VP, VDIG (potažmo VIO napájené pinem VP) roste napětí. Pokud je pin VIO napájen z mikrokontroléru (první modul v zapojení za účely snížení spotřeby) je třeba, aby toto napájení bylo stabilní a vyšší než mezní hodnota uvedená v dokumentaci.
2. Jakmile dojde k dosažení mezní hodnoty napětí pinu VDIG, dojde k sepnutí interního 1,8 V regulátoru (VDD pin). Jelikož je referencí pro VDD pin VREF, musí tento pin dosáhnout finálního napětí ještě před VDD.
3. Ve chvíli, kdy VP, VDIG, VIO a VDD piny dosáhnou svých mezních napěťových hodnot, dojde ke startu oscilátoru.
4. Konečný stavový automat je uveden do provozu a je vyslán budící tón skrze piny COMMH+ a COMMH-.
5. Stavový automat vyčkává 10 μ s na EEPROM.
6. Systémové registry z jsou načteny z EEPROM.

7. Relevantní informace jsou posílány do analogových registrů.
8. V případě, že je povolena GPIO adresace modulů, GPIO piny jsou vzorkovány, aby mohla být determinována komunikační adresa každého zařízení.
9. Data z teplotních senzorů jsou vzorkována uživatelem. Během této periody nejsou vzorkovány žádné další kanály.
10. Uživatel maskuje všechny chyby, které se během načtení vyskytly.
11. Uživatel nastaví a monitoruje UART komunikaci.
12. Vyřešení dalších chyb z analogové části obvodu.
13. Je potřeba vyčkat na ukončení probouzejícího signálu.
14. Uživatel provádí příkazy přes diferenciální komunikaci.
15. Až bude maskován bit signalizující detekci resetu uživatelem, je možné vypnout obvod externího NPN regulátoru, pokud je vypnutý regulátor. [19]

Obvod **bq76PL455A-Q1** disponuje až 256 registry, kterými je možné posílat a přijímat data, nastavovat mezní hladiny přepětí a podpětí, parametry AD převodníku nebo například parametry komunikační. V defaultním stavu je rychlost komunikace 250 Kbaud . Maximální rychlost je až 1 Mbaud . Každý modul v Daisy Chain zapojení musí mít svůj vlastní jednoznačný identifikátor. Tímto identifikátorem je adresa a je možné adresovat moduly dvěma způsoby:

1. adresování pomocí GPIO pinů mikrokontroléru,
2. automatické adresování pomocí úvodní adresovací sekvence.

Metoda automatického adresování naprosto ignoruje piny GPIO a je možné zvolit vlastní adresy pro použité moduly. K adresaci jednotlivých modulů jsou v tom případě potřeba pouze komunikační vodiče UART a nevyužité GPIO vodiče je možné použít pro indikaci chybových stavů. [25]

Na desku plošných spojů byl integrován budič CAN komunikace SN65HVD232 napájený typicky $3,3\text{ V}$. Pro testování algoritmu komunikace byl implementován nulový rezistor a relé řízené GPIO pinem mikrokontroléru.

5.1.1 Komunikace UART

UART komunikace probíhá mezi dvěma zařízeními, kdy dochází k odesílání ze strany prvního (vysílače) a příjmu ze strany druhého zařízení (přijímače). Oproti synchronním typům komunikace v tomto případě nehraje roli synchronizační hodinový signál. Namísto toho jsou na začátku a na konci datového rámce přítomny bity označující právě tyto dvě

pozice. Díky start a stop bitu je možno identifikovat celý rámeček. Vzhledem k sériovému charakteru komunikace jsou bit po bitu přenášena data mezi oběma zařízeními. Před tím než jsou k datovému rámci přidány start a stop bity, jsou data konvertována do sériového tvaru. Standardní tvar rámce je na obrázku 5.1 [21][22][23]



Obr. 5.1: Standardní tvar rámce UART |Převzato z [23]|

- **Start Bit** – Též označován jako synchronizační bit je prvním bitem v rámci. Při nečinnosti komunikace je signál ve vysoké úrovni. V případě nového přenosu klesne hladina signálu do nízké úrovně (start bit) a je zahájen přenos.
- **Datové Bity** – Bity obsahující informaci, kterou bylo původně zamýšleno přenést následují za start bitem.
- **Stop Bit** – Stop bit je vždy poslední částí paketu. Běžně se jedná o dva bity vysoké úrovně, avšak často je používán pouze jeden bit zastupující tuto funkci.
- **Paritní Bit** – Paritní bit slouží k ověření správnosti přenesených dat. Toto řešení je k dispozici ve dvou možných variantách a to lichá nebo sudá parita. Paritní bit není pro přenos mandatorní a v mnoha případech bývá i vynechán, ačkoliv se jedná o indikaci chyb přenosu. [23]

5.1.2 Výhody UART komunikace

Mezi nesporné výhody UART komunikace bychom mohli zařadit:

- Možnost plně duplexního přenosu za použití pouze dvou vodičů,
- odpadá nutnost přítomnosti synchronizačního hodinového signálu nebo jiného způsobu časování,
- integrovaná kontrola chyby ve formě paritních bitů. [23]

5.1.3 Nevýhody UART komunikace

Kromě výhod se však u UART komunikace můžeme setkat i s nedostatky, kterými jsou:

- datový rámeček je omezen velikostí,
- relativně malá rychlost přenosu v porovnání s paralelní komunikací,

- kvůli absenci synchronizačních signálů a časování nutnost ošetřit rychlost vysílání a příjmu na obou stranách,
- chybí podpora více slave zařízení. [23]

5.1.4 Controlled Area Network

Controlled Area Network neboli CAN je typ komunikační sběrnice zcela běžně využívaný v automotive průmyslu. Celá sběrnice je koncipována tak, aby svojí funkcí připomínala nervový systém vzájemně propojených uzlů. Po této sběrnici jsou přenášena data z většiny řídicích jednotek a jejich jednotlivých periférií. Sběrnice sestává ze dvou vodičů:

- CAN high,
- CAN low.

Výhodou sběrnice je distribuce dat v reálném čase, prioritní systém zpráv na základě identifikátoru obsaženého v rámci, kdy logická nula ve zprávě představuje dominantní stav, možnost vyslání zprávy libovolným uzlem na sběrnici, automatické odpojení vadných uzlů a detekce chyb komunikace včetně automatického opětovného vysílání vadně doručených zpráv. Klasická sběrnice CAN umožňuje rychlost až 1 MB/s při vzdálenosti 40 metrů. S rostoucí vzdáleností rychlost klesá. Existuje množství standardů pro sběrnici, které rozšiřují její možnosti pro určitá zaměření (CANopen, CAN FD, OBD2 a další).

Sběrnice CAN je mezinárodní normou ISO 11898 a pokrývá linkovou a fyzickou vrstvu ISO/OSI modelu. Při přenosu každého bitu lze rozeznat u CAN sběrnice 4 segmenty. Prvním segmentem je segment synchronizační, kdy je očekávána hrana signálu, segment propagační (kompenzace zpoždění signálu délkou vedení) a dva vzorkovací segmenty. Standardní rámec CAN sběrnice (CAN 2.0A) sestává z následujících částí:

1. **start rámce**,
2. **identifikátor zprávy** – v identifikátoru zprávy je stanoven typ zprávy a také její priorita. Ve standardním rámci sestává z 1 bitu.
3. **Remote Transmission Request** – kde je určeno, zda uzel data posílá nebo o ně žádá.
4. **Identifier Extension** – identifikace standardního nebo rozšířeného formátu,
5. **délka dat** – až 8 bytů,
6. **datová část**,
7. **CRC** – cyklický redundantní kód pro kontrolu správnosti dat,
8. **End of CRC**,

9. **Acknowledge** – dva bity potvrzující správnost přijímacích dat na straně přijímače.
10. **End of Frame** – 7 bitů, které ukončují zprávu.

Na straně řídicího mikrokontroléru (CAN řadiče) jsou vodiče Tx pro vysílání a Rx pro příjem dat z CAN budiče. V dominantním stavu je CAN High na úrovni 3,5 V a CAN Low na úrovni 1,5 V, přičemž diference je 2 V. V případě recesivního stavu mají oba vodiče úroveň 2,5 V a výsledkem je diference 0 V. K rozeznání stavu na sběrnici je tedy využit rozdíl CAN High a CAN Low. Tento způsob diferenciální komunikace je velmi vhodný k potlačení rušení díky odečtení potencionálně zarušených signálů. [30]

5.1.5 Kroky pro automatické adresování

1. Je třeba se ujistit, že jsou všechny moduly v probuzeném stavu a připraveny přijmout příkaz AUTO-ADDRESS ENABLE.
2. Uživatel povolí sestupnou komunikaci na všech modulech v zapojení.
3. Uvedení všech modulů do režimu automatického učení adres.
4. Zaslání adres jednotlivým modulům v sestupném pořadí (např. druhé zařízení s adresou 1 a první s adresou 0).
5. Zpětné vyčtení adres z každého zařízení v rámci kontroly. V tomto případě výčet probíhá od prvního zařízení a jako poslední odpovídá nejvýše zapojený modul.
6. Vypnutí vzestupné komunikace u posledního zařízení.
7. Vypnutí jednosměrné komunikace u všech modulů kromě prvního v pořadí. [25]

5.1.6 Formát příkazů při komunikaci s bq76PL455A-Q1

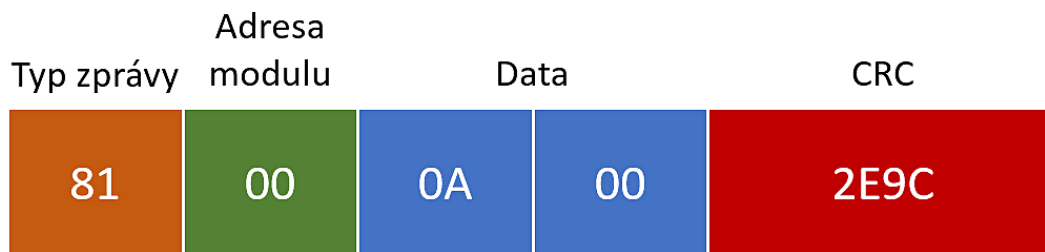
Každá zpráva musí mít specifický tvar rámce. První byte rámce specifikuje typ zprávy. Může se jednat o zprávu pro specifický modul s požadavkem na odpověď nebo pro všechny moduly (tzv. broadcast) bez nutnosti odpovědi ze strany modulů. Dalším bytem je adresa registru (0 - 255). Následují data, která mohou být jeden nebo dva byty. Poslední částí rámce je CRC kód o dvou bytech.

Pokud tedy chceme vyčíst adresy dvou modulů v sérii, bude postup následující:

- Vyšleme zprávu 81 00 0A 00 2E9C, kde 81 značí, že se jedná o zprávu pro konkrétní zařízení a že uživatel očekává odpověď. Byte 00 symbolizuje adresu prvního zařízení v sérii, kterému byla přiřazena adresa 0. 0A je pak adresa registru (ADDR) a 00 je počet očekávaných datových bytů v odpovědi (v tomto případě jeden). Zbytek bytů je pak kontrolní CRC kód.

- Přejde odpověď 00 00 0000 značící odpověď dat o jednom bytu, druhý byte značí adresu zařízení a CRC je 0000.
- Vyšleme zprávu 81 01 0A 00 7F5C. Liší se zde pouze druhý byte a je o jedna vyšší. To znamená, že chceme znát adresu dalšího modulu v sérii.
- Přejde odpověď 00 01 C1C0. Zde je už viditelná analogie příkazu pro výčet adresy.

Určitě stojí za povšimnutí, že v případě dotazu na jedno konkrétní zařízení není nutno dodržet sestupné pořadí modulů při zasílání zpráv. Při adresaci je jeden datový byte využit jako adresa dotazovaného modulu. Pokud budeme chtít vyčíst adresu z dalšího zařízení a nedostane se nám odpovědi, je předchozí zařízení poslední v sérii. Příklad komunikačního rámce je na obrázku 5.2. [25]

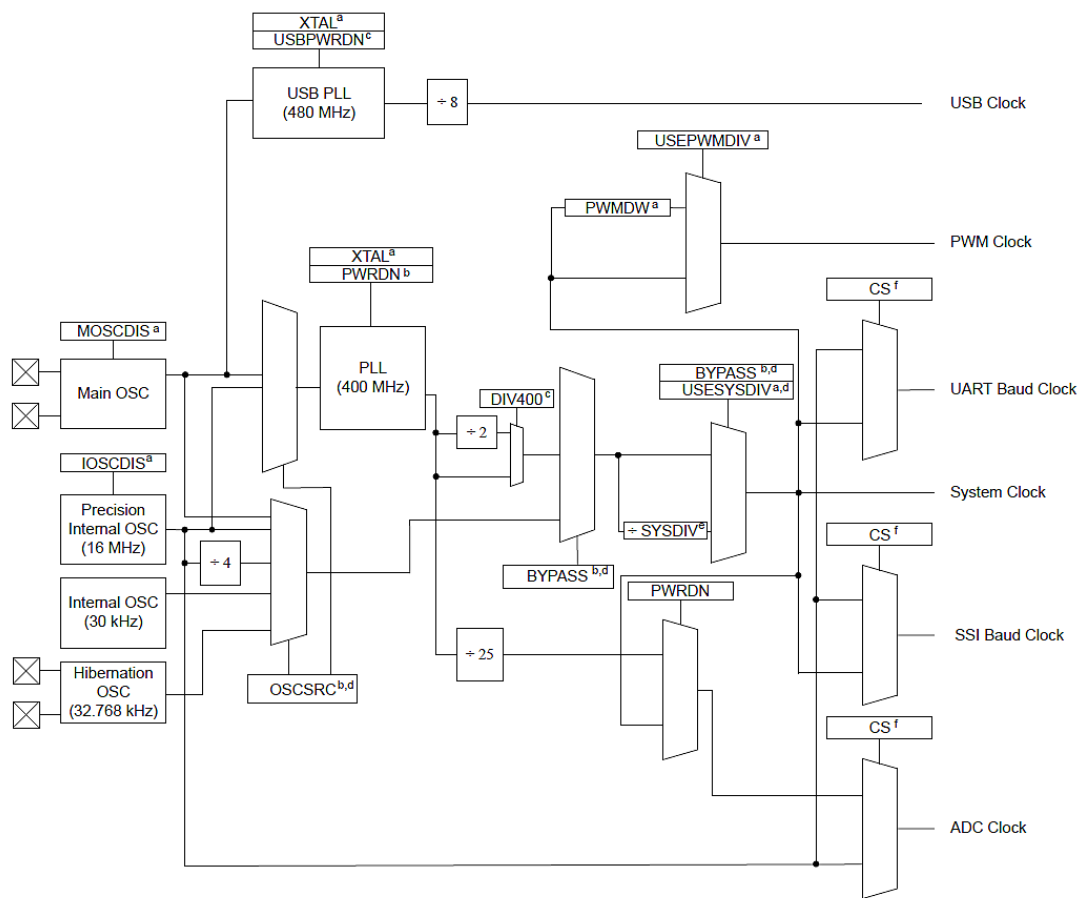


Obr. 5.2: Příklad komunikačního rámce pro bq76PL455A-Q1 |Převzato z [19]|

5.2 Program pro komunikaci s bq76PL455A-Q1

Před zahájením UART komunikace je potřeba inicializovat piny použitého mikrokontroléru. Nejprve je třeba nastavit systémové hodiny. Na obrázku 5.3 je vyzobrazen strom hodin použitého mikrokontroléru **TM4C123GH6PM**. Jmenovitě UART má registr pro řízení hodin v periférním registru, kterým je možné nastavit zdroj hodin pro danou periférii. Uživatel může zvolit mezi hlavním oscilátorem s externím krystalem pro kmitočet až 25 MHz nebo integrovaným přesným oscilátorem o kmitočtu 16 MHz . Oba tyto signály mohou být zdrojem pro PLL, jehož výstupní kmitočet (400 MHz) je nejprve dělen na 200 MHz a následně uživatelem zvolenou hodnotou v registru SYSDIV. Konkrétně v tomto projektu je použit výstup z PLL, který je dělen na finální hodnotu 20 MHz . Jako zdroj pro PLL slouží hlavní oscilátor s externím krystalem s výstupním kmitočtem 16 MHz . Externí krystal lze volit v registru RCC. [26]

Pro nastavení UART musí uživatel nejprve povolit hodiny a tím aktivovat danou periférii. Následně povolit hodiny do pinů, které svojí alternativní funkcí reprezentují komunikační vstupy a výstupy UART. Na základě nastavení systémových hodin byla v tomto případě nastavena rychlost přenosu UART, jeden STOP bit a žádný paritní bit (kontrola přenosu je prováděna pomocí CRC). Použitý mikrokontrolér využívá pro UART



Obr. 5.3: Strom hodin mikrokontroléru TM4C123GH6PM [Převzato z [26]]

přenos šestnáctimístný FIFO zásobník o osmi bitech v každé pozici zvlášť pro příjem a vysílání. V případě naplnění vysílacího fifo zásobníku se v příznakovém registru projeví bity značící vytiženost UART (BUSY) a naplnění vysílacího zásobníku (NON-EMPTY). Bit BUSY je negován až v případě vyprázdnění vysílacího fifo zásobníku. V případě příjmu je potřeba nejprve vyhodnotit podmínku, zda není přijímací fifo prázdné (NON-EMPTY) vzhledem k tomu, že se při příjmu program odkazuje na blokující funkci a existuje riziko, že zůstane v nekonečné smyčce při čekání na data, která neexistují. Po vyčtení dat dojde ke shoení příznaku (fifo NON-EMPTY) a nahození příznaku (fifo EMPTY) pro přijímací zásobník. Pro WAKEUP pin bylo nastaveno GPIO jako digitální výstup. [26]

Rutina pro povolení a nastavení periférie UART1

```

1
2 if(!SysCtlPeripheralReady(SYSCTL_PERIPH_GPIOB)) //GPIOB povoleno?
3 {
4     MAP_SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_GPIOB); //Pokud ne, povolit
5
6     while(!SysCtlPeripheralReady(SYSCTL_PERIPH_GPIOB)); //Čekání na povolení
7
8 }
9
10 MAP_SysCtlPeripheralEnable(SYSCTL_PERIPH_UART1); //Povolení UART1
11
12 while(!SysCtlPeripheralReady(SYSCTL_PERIPH_UART1)); //Čekání na povolení
13
14
15 /*
16 Nastavení hodin pro UART1. Zdrojem PLL signál o 20 MHz, 250 kBaud, 8 bitů dat,
17 1 stop bit, žádný paritní bit
18 */
19 MAP_UARTConfigSetExpClk(UART1_BASE, SysCtlClockGet(), 250000,
20                          (UART_CONFIG_WLEN_8 | UART_CONFIG_STOP_ONE |
21                           UART_CONFIG_PAR_NONE));
22

```

Sekvence pro nastavení komunikace s **bq76PL455A-Q1** je následující:

- každý zapnutý modul v zapojení je zápisem bitu PWRDN do registru na adrese 12 (DEV_CTRL) vypnut a následně zapsáním logické 1 do pinu WAKEUP probuzen.
- Zamaskování chyby v registru 107 (MASK_DEV),
- shození všech chybových příznaků v registrech 81 (STATUS) a 82 (FAULT_SUM),
- nastavení automatické adresace všech modulů. To zahrnuje povolení hystereze komparátoru, zapsání logické 1 do ADDRSEL, zakázání interního NPN regulátoru v registru 14 (DEVCONFIG) a naprogramování EEPROM v registru 12 (DEV_CTRL). Po této sekvenci příkazů bude při oslovení konkrétního modulu druhý byte zpracováván jako adresa daného modulu.
- Přidružení adres jednotlivým modulům (viz 5.1.6) pomocí registru 10 (ADDR). V tomto případě je přiřazeno 0x00 pro spodní modul, který přímo komunikuje s mikrokontrolérem a 0x01 pro vrchní modul.
- Nastavení komunikačních parametrů dle požadavků. Mezi tyto parametry patří baud-rate, povolení/zakázání diferencíální komunikace ze spodní/vrchní strany na základě pozice modulu. Pokud je v zapojení pouze jeden modul, je žádoucí povolit pouze Single Ended komunikaci. Pro modul na vrcholu řetězce je žádoucí povolit pouze komunikaci zespodu a u spodního pouze komunikaci z vrchní strany řetězce. V případě použití tří a více modulů se pro všechny moduly ve středu řetězce povoluje oboustranná diferencíální komunikace. Je potřeba si uvědomit, že po resetu zařízení je rychlost přenosu komunikace nastavena na 250 *Kbaud*. Přesně takovouto rychlostí musí mikrokontrolér být schopen zprvu komunikovat, než dojde ke změně požadavkem formou zápisu do registru 16 (COMCONFIG). Po změně komunikační

rychlosti BMS obvodu musí uživatel znovu inicializovat UART s novou přenosovou rychlostí, která je opět shodná s nově nastavenou rychlostí přenosu obvodu BMS.

- Shození všech chybových příznaků zápisem do registru 81 a 82 (STATUS a FAULT_SUM),
- nastavení zpoždění multiplexeru, vzorkovací periody AD převodníku a převzorkování v registrech 61(SMPL_DLY1), 62 (CELL_SPER) a 7 (OVERSMPL),
- opětovné maskování chybových příznaků a následná kontrola vyčtením registrů 81 a 82 (STATUS a FAULT_SUM),
- v případě nepřítomnosti chybových příznaků jednotlivých modulů, může uživatel pokračovat finálním nastavením. Nastavení počtu kanálů u každého modulu se provádí zápisem do registrů 13 (NCHAN) a 3 (CHANNELS). V těchto registrech je nastaven počet článků, které daný modul měří, stejně tak počet AUX vstupů pro měření teploty. Toto nastavení provádí uživatel buďto jako příkaz pro jednotlivé moduly nebo jako příkaz pro všechny moduly současně. Ve druhém případě je nastaven shodný počet kanálů pro všechny moduly.
- Stejným způsobem lze nastavit hranici pro přepětí a podpětí článků zapsáním do registrů 144 (CELL_OV) a 142 (CELL_UV).
- Zapsáním do Command registru (registr s adresou 2) lze vyžádat navzorkované hodnoty všech přednastavených kanálů. Příkazy lze rozdělit do několika fází. Uživatel může poslat příkaz pro navzorkování a uložení hodnot přednastavených kanálů zapsáním logických nul do Command registru. Obvod pak nepošle zpět žádnou odpověď, pouze si uloží aktuální napěťové hladiny článků pro pozdější zaslání. V případě zapsání jedniček do příslušných bitů v Command registru dojde k vrácení odpovědi ve formě napěťových hladin přednastavených navzorkovaných kanálů. [19][25]

Ukázka kódu sekvence zde popsané je v 5.2.1.

5.2.1 Ukázka kódu pro komunikaci s bq76PL455A-Q1

```
1
2 //Maskování chyb v registru Chip Fault Masks
3 WriteReg(0, 107, 0x8000, 2, FRMWRT_ALL_NR);
4
5 //Shození chybových příznaků
6 WriteReg(0, 82, 0xFFC0, 2, FRMWRT_ALL_NR);
7 WriteReg(0, 81, 0x38, 1, FRMWRT_ALL_NR);
8
9 //Nastavení automatické adresace
10 WriteReg(0, 14, 0x19, 1, FRMWRT_ALL_NR);
11 WriteReg(0, 12, 0x08, 1, FRMWRT_ALL_NR);
12
13 //Nastavení počtu článků
14 WriteReg(0, 13, 0x0E, 1, FRMWRT_SGL_NR); //První modul - 14 článků
15 WriteReg(1, 13, 0x06, 1, FRMWRT_SGL_NR); //Druhý modul - 6 článků
16
17 //Zaslání identifikačních adres jednotlivým modulům
18 for (nDev_ID = 0; nDev_ID < TOTALBOARDS; nDev_ID++)
19 {
20     WriteReg(nDev_ID, 10, nDev_ID, 1, FRMWRT_ALL_NR);
21 }
22
23 //Rychlost přenosu, povolení diferenciální komunikace
24 WriteReg(0, 16, 0x10F8, 2, FRMWRT_ALL_NR);
25
26 //Nastavení komunikace pro vrchní desku v Daisy Chain
27 WriteReg(nDev_ID, 16, 0x1028, 2, FRMWRT_SGL_NR);
28
29 //Nastavení komunikace pro spodní desku v Daisy Chain
30 WriteReg(nDev_ID, 16, 0x10D0, 2, FRMWRT_SGL_NR);
31
32 //Opětovné shození chybových příznaků
33 WriteReg(0, 82, 0xFFC0, 2, FRMWRT_ALL_NR);
34 WriteReg(0, 81, 0x38, 1, FRMWRT_ALL_NR);
35
36 for (nDev_ID = TOTALBOARDS - 1; nDev_ID >= 0; --nDev_ID)
37 {
38     //Zpoždění multiplexeru 0 ms
39     WriteReg(nDev_ID, 60, 0x00, 1, FRMWRT_SGL_NR);
40
41     //Nulové počáteční zpoždění
42     WriteReg(nDev_ID, 61, 0x00, 1, FRMWRT_SGL_NR);
43
44     //Vzorkovací interval vzorkování AD převodníku 99.92 us
45     WriteReg(nDev_ID, 62, 0xCC, 1, FRMWRT_SGL_NR); period
46
47     //Žádné převzorkování
48     WriteReg(nDev_ID, 7, 0x00, 1, FRMWRT_SGL_NR);
49
50     //Shození chybových příznaků
51     WriteReg(nDev_ID, 81, 0x38, 1, FRMWRT_SGL_NR);
52     WriteReg(nDev_ID, 82, 0xFFC0, 2, FRMWRT_SGL_NR);
53
54     //Vyčtení registrů pro chybové příznaky
55     ReadReg(nDev_ID, 81, &wTemp, 1, 0);
56     ReadReg(nDev_ID, 82, &wTemp, 2, 0);
57
58     //Nastavení spodní a horní napěťové hranice článků
59     WriteReg(0, 144, 0xD1EC, 2, FRMWRT_ALL_NR); //Max. 4.1000V
60     WriteReg(0, 142, 0x6148, 2, FRMWRT_ALL_NR); //Min. 1.9000V
61
62     //Příkaz pro navzorkování hodnot
63     WriteReg(nDev_ID, 2, 0x00, 1, FRMWRT_SGL_NR);
64
65     //Příkaz pro navrácení navzorkovaných hodnot
66     WriteReg(nDev_ID, 2, 0x20, 1, FRMWRT_SGL_R);
67 }
68
```

Jednotlivé funkce obsažené v úryvku jsou k dohledání v příloze B.

V programu je zakomponována funkce, která při příjmu odpovědi na příkaz pro adresaci jednotlivých modulů vrací hodnotu 1 nebo 0 pro ověření správnosti vrácených dat. Při návratové hodnotě 1 je porovnáván byte z odpovědi, který obsahuje adresu modulu. Na základě tohoto bytu je poté spočteno, kolik modulů je v zapojení obsaženo a jaká adresa náleží příslušnému modulu.

Pro kontrolu správnosti příkazů je počítán a posílán/přijímán šestnáctibitový cyklický redundantní kód (CRC). Tento kód je v přijímači odečten a v případě nulového výsledku lze konstatovat správný přenos. Pokud bude výsledek po odečtení přijímacího a vysílaného CRC nenulový, jedná se o chybu komunikace.

Po nastavení a ověření správnosti komunikace všech modulů je možné naprogramovat obsah registrů z ROM paměti do EEPROM. Při programování EEPROM je zde limitace v počtu možných prepisů paměti, proto se nedoporučuje provádět prepis paměti EEPROM lehkovážně. Prepis EEPROM nám umožňuje vynechat prvotní nastavení komunikace a chování obvodu po resetu. Finální program tak může být omezen na příkazy vztahující se k uživatelské obsluze.

Naprogramování EEPROM zahrnuje 4 kroky:

1. zapsání čísla označovaného jako MAGIC 1. Jedná se o konkrétní číslo a to 0x8C2DB194. Hlavní úlohou tohoto čísla je zabezpečení proti náhodným prepisům EEPROM.
2. Zapsání čísla označovaného jako MAGIC 2. Hodnota tohoto čísla je 0xA375E60F a jeho účel je totožný s číslem MAGIC 1.
3. Zahájení prepisu EEPROM zápisem bitu WRITE EEPROM v registru 12 (DEV_CTRL),
4. vyčkání na dokončení prepisu EEPROM. Je velmi podstatné během tohoto kroku neposílat žádné příkazy a též neodpojovat zařízení. Průměrná doba provedení prepisu EEPROM je 200 ms a dokončení tohoto procesu se dá ověřit vyčtením registru z předchozího kroku. Pokud jsou odpovědi na příkaz vyčtení registru 4 byty nul, byla operace úspěšně dokončena.

Tato operace může být provedena jak pro jednotlivé moduly, tak jako tzv. „broadcast“ pro všechny moduly současně. Doba nutná pro dokončení prepisu EEPROM je však delší.

Obvod **bq76PL455A-Q1** disponuje šesti GPIO piny. Tyto piny mohou sloužit jednak k adresaci jednotlivých modulů (v tomto projektu bylo použito automatické adresování pomocí UART) a jednak k signalizaci chyb. Uživatel může pomocí registrů (viz [19]) nastavit PULL-UP/PULL-DOWN rezistory ze strany **bq76PL455A-Q1**, avšak neexistuje žádná logika obvodu, která by tyto rezistory kontrolovala, takže je potřeba dbát na to, aby nebyly sepnuty oba typy těchto rezistorů v rámci jednoho GPIO. Dalším možným nastavením je, které GPIO piny budou využívány. V registrech uživatel nastaví, jestli GPIO generuje chybu ve vysoké nebo nízké úrovni. Na základě těchto nastavení jsou podle logiky programu posílány chybové kódy GPIO.

Další velmi užitečnou funkcí pro snížení zátěže procesorové jednotky a omezení komunikačního toku je Auto-Monitor. Pokud je obvod v tomto režimu, dochází k automatickému vzorkování a skladování hodnot včetně detekce chyb automaticky s přednastavenou periodou v příslušném registru. Tento režim je nutné vypnout v případě potřeby manuálního vyžádání navzorkování hodnot kanálů.

Po získání naměřených hodnot z přednastavených kanálů pomocí registrů je nutné přepočítat hodnotu z výstupu AD převodníku na hodnotu napětí. K tomu slouží rovnice 5.1.

$$U_{lnku} = \frac{2 * U_{REF}}{65535} * hodnotaHex \quad [V, V], \quad (5.1)$$

kde U_{REF} je hodnota referenčního napětí AD převodníku ($2,5 V$) a $hodnotaHex$ jsou dva byty rámce pro příslušný kanál. Spolu s tímto přepočtem je potřeba provést i kalibraci hodnot, které jsou počtem cyklů pájení součástek ovlivněny. Korekce AD převodníku se provádí dvěma měřeními. Na vstup článku je přivedena známá hodnota napětí ze stabilního stejnosměrného zdroje (U_{IN1}) a zaznamenán výstup (U_{OUT1}) AD převodníku. Poté je přivedena jiná známá hodnota ze zdroje (U_{IN2}) a výstup (U_{OUT2}) též zaznamenán. Hodnoty musí být však mezi $2 - 4,5 V$ vzhledem k rozsahům měřených napětí. Ze získaných hodnot je spočtena hodnota m .

$$m = \frac{U_{OUT2} - U_{OUT1}}{U_{IN2} - U_{IN1}} \quad [V] \quad (5.2)$$

Pomocí hodnoty m z rovnice 5.2 je možné spočítat chybu zesílení.

$$\begin{aligned} GEC &= \left(\frac{1}{m} - 1\right) * \frac{5}{2^{16}} \\ &= \left(\left(\frac{1}{m}\right) - 1\right) * 2^{16} \quad [-] \end{aligned} \quad (5.3)$$

Hodnotu z rovnice 5.3 uživatel zapíše do registru VSGAIN. Následuje výpočet korekce chybového offsetu. Při tomto výpočtu využijeme hodnoty m , (U_{IN1}) a (U_{OUT1}). Rozsah hodnot korekce chybového offsetu je od $-9,77 mV$ do $9,69 mV$. Postup pro výpočet korekce chybového offsetu je popsán v rovnici 5.4.

$$\begin{aligned} OEC &= \left(\frac{U_{IN1} - \left(\frac{1}{m}\right) * U_{OUT1}}{\frac{5}{2^{16}}}\right) \\ &= \left(U_{IN1} - \left(\frac{1}{m}\right) * U_{OUT1}\right) * \frac{2^{16}}{5} \quad [-] \end{aligned} \quad (5.4)$$

Výsledná hodnota je pak zapsána do registru VSOFFSET a uložíme do EEPROM procesem, který je popsán výše. Měření by mělo probíhat za stabilních okolních podmínek při pokojové teplotě. [19][25]

5.3 Odvození stavu nabití akumulátoru

Signalizace stavu nabití akumulátoru je zejména pro uživatele důležitým indikátorem při provozu bateriově napájeného zařízení. Pokud se ale pozorně podíváme na obrázek 1.4 v sekci 1.3.1 vyzorujeme, že převážná část vybíjecí křivky (zejména u grafitových článků) je od 20 % až do 90 % stupně vybití z hlediska napětí téměř neměnná. Existuje množství způsobů odvození stavu nabití, jakožto sekundárního parametru akumulátoru. Mezi tyto metody lze zahrnout například metodu měření bezproudového napětí nebo Coulombovu metodu počítání náboje. [1]

5.3.1 Metoda měření bezproudového napětí

Jednou z těchto metod, která je zároveň nejjednodušší, je metoda měření bezproudového napětí akumulátoru. Tato metoda spočívá v měření napětí na člancích akumulátoru ve chvíli, kdy nejsou články vybíjeny. Tato metoda je v ohledu přesnosti problematická právě díky nepatrné změně napětí jednotlivých článků během vybíjení. Od 40 % do 80 % stavu vybití klesne napětí na článku pouze o 0,5 V. To znamená, že odvození stavu nabití bude v převážné části cyklu nepřesné. Lépe by tato metoda byla uplatněna například v případě akumulátoru olověného. [28]

5.3.2 Coulombova metoda počítání náboje

Další metodou pro odvození stavu nabití je Coulombova metoda počítání náboje. Základem pro tuto metodu je integrace proudu během provozu článků akumulátoru, čímž je umožněno sledování stavu náboje. Integrace proudu udává množství elektrického náboje dodaného nebo odebraného z baterie. Tento fakt činí z této metody přesnější variantu, snadno implementovatelnou pro řešení, kde je omezené množství paměti potřebné pro aritmetické operace, jakým je například mikrokontrolér. Články během odvození stavu nabití mohou být využívány a nemusí být odpojeny od zátěže jako v případě metody měření bezproudového napětí. U lithiových akumulátorů za použití této metody je chyba odvození menší než 1 %, což je velmi vhodné vzhledem k předchozím kritériím. [28]

Na základě Coulombova zákona můžeme spočítat náboj následovně:

$$Q_{ACC} = \int_0^{\delta t} i * dt \quad [C, s, A], \quad (5.5)$$

kde Q_{ACC} je nově akumulovaný náboj a reprezentuje množství naakumulovaného náboje za dobu δt . Po převedení rovnice 5.5 do diskretní formy získáváme:

$$Q_{ACC} = \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n I_k\right) * \delta t \quad [C, A, s]. \quad (5.6)$$

V této rovnici n reprezentuje počet měření proudu a k značí k -té měření proudu I během intervalu δt . Na základě toho, že výrobce specifikuje kapacitu v jednotkách Am-

pérhodin (Ah), je užitečné volit dobu δt jako celočíselný podíl jedné hodiny. Z důvodu omezené kapacity paměti mikrokontroléru potřebné k provádění aritmetických operací lze počet měření během jedné hodiny zredukovat na 128 cyklů s použitím bitových posunů pro potřebná dělení v rovnici. Pro zpřesnění měření lze prezentovat každý výsledek jako průměrnou hodnotu z 32 vzorků proudu, které jsou konvertovány AD převodníkem mikrokontroléru. V průběhu měření dostáváme:

$$Q_{REM} = Q_{PREV} + -Q_{ACC} \quad [C, C, C]. \quad (5.7)$$

Q_{REM} je zbývající náboj baterie, Q_{PREV} je její náboj z předchozího měření a znaménko indikuje, zda byl náboj dodán (+) nebo odebrán (-).

Tato metoda odvození stavu nabití je v případě použití mikrokontroléru ideální, avšak je potřeba rozšířit stávající obvod o další komponenty. Těmi jsou operační zesilovače pro zesílení napětí získané na měřicím rezistoru. [29]

5.4 Balancování článků v obvodu bq76PL455A-Q1

Pro obsluhu balancování v obvodu BMS slouží několik registrů. Konkrétně se jedná o registry následující:

- **CBCONFIG (19)** – registr sloužící k nastavení intervalu, po jakém bude balancování automaticky vypnuto. Časovač může být vypnut, aby vypínání balancování bylo řízeno pouze algoritmem a maximální možná doba kontinuálního balancování může být nastavena na 60 minut. Tento registr disponuje bitem, kterým lze balancování zakázat v případě, že se během komunikace vyskytla chyba.
- **CBENBL (20 - 21)** – 16-ti bitový registr, jehož každý bit zastupuje jeden článek (MSB pro 16. článek a LSB pro 1. článek). Pokud je příslušný bit přepsán na vysokou logickou úroveň, je sepnut tranzistor signálem EQ a článek je vybíjen přes vybíjecí rezistor. Proces je signalizován rozsvícením příslušné LED diody (příloha A.1), která zůstává rozsvícena po celou dobu balancování článku. Pokud je aktivní bit bránící balancování v případě chyby z registru CBCONFIG a je signalizován příznak chyby, který nebyl shozen, budou případné zápisy logických jedniček ignorovány. [19]

Samotný algoritmus pro balancování pak funguje tak, že po naměření napětí na všech článcích je v cyklu zjištěno, jaké je nejvyšší napětí ve stacku a o jaký článek se jedná. Balancování neprobíhá hned po spuštění, ale je na 20 prvních cyklů měření vynecháno. Tím získá obvod dostatek času pro správnou funkčnost. Pro zvýšení univerzálnosti kódu jsou měřeny i nezapojené články. Pokud je nulové napětí na vstupu, na kterém by měl být článek, je tento vstup při porovnání ignorován. Článek s nejvyšším napětím je porovnáván s ostatními články a je počítán rozdíl napětí. Pokud je tento rozdíl větší nebo roven 100 mV , je sepnuto balancování daného článku, dokud není rozdíl napětí těchto článků v mezích.

Algoritmus pro balancování článků

```

for(cellNum = 0; cellNum < 21; cellNum++) //Zjištění nejvyššího napětí a článku s nejvyšším napětím
{
    if((voltageReversed[cellNum] > highestVoltage) && (voltageReversed[cellNum] > 1))
    {
        highestVoltage = voltageReversed[cellNum];
        highestVoltageCell = cellNum + 1;
    }
}
for(cellNum = 0; cellNum < 21; cellNum++)
{
    if(voltageReversed[cellNum] > 1.0) //Ověření, zda je článek zapojen
    {
        voltageDiff = highestVoltage - voltageReversed[cellNum]; //Rozdíl napětí mezi nejvyšším napětím a ostatními
    }
    else
    {
        voltageDiff = -1; //Pokud článek nezapojen, rozdíl je -1
    }
    if((voltageDiff >= 0.10) && (voltageReversed[cellNum] > 1.0))
    {
        //Rozdělení všech měřených napětí na jednotlivé moduly
        if(highestVoltageCell > 14)
        {
            nDevID = 1; //Druhý modul
            highestVoltageCell -= 15; //Nutno u druhé desky udělat posun o 14 článků + mezeru
            //Mezera značí hranici mezi moduly v poli

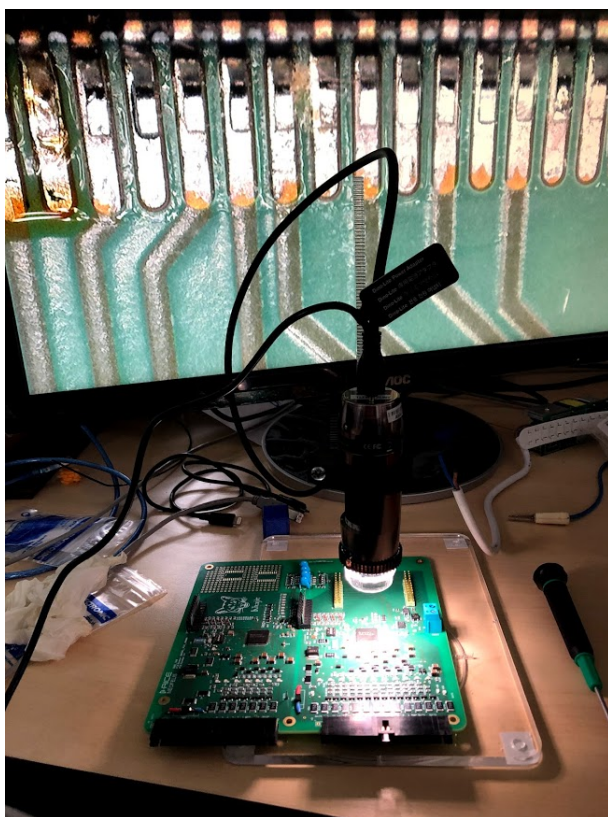
            WriteReg(nDevID, 20, pow(2, (highestVoltageCell - 1)), 2, FRMWRT_SGL_NR); //Zapnutí balancování
        }
        else
        {
            nDevID = 0; //První modul
            WriteReg(nDevID, 20, pow(2, (highestVoltageCell - 1)), 2, FRMWRT_SGL_NR); //Zapnutí balancování
        }
    }
    else if((voltageDiff >= 0) && (voltageDiff < 0.10))
    {
        if(highestVoltageCell > 14)
        {
            nDevID = 1;
            WriteReg(nDevID, 20, 0x0000, 2, FRMWRT_SGL_NR); //Vypnutí balancování
        }
        else
        {
            nDevID = 0;
            WriteReg(nDevID, 20, 0x0000, 2, FRMWRT_SGL_NR); //Vypnutí balancování
        }
    }
    else
    {
        break;
    }
}

```

6

Experimentální oživení BMS obvodu

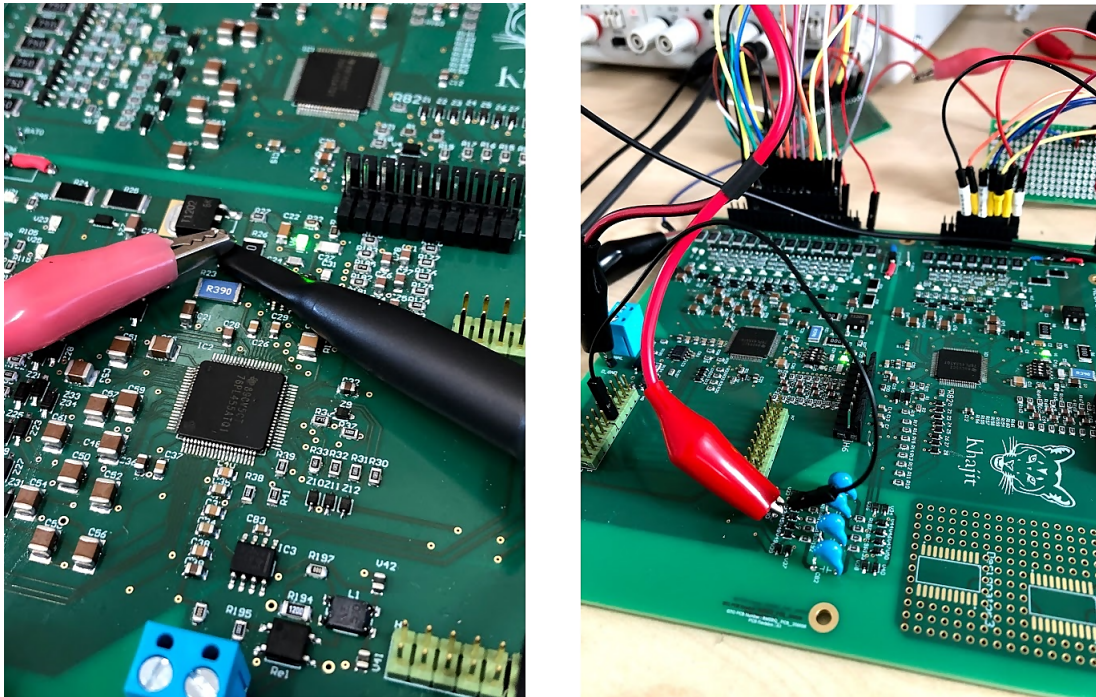
Po dokončení návrhu DPS byl obvod osazen a proběhla kontrola pod mikroskopem pro případné zkratky a jiné defekty. Na obrázku 6.1 je fotografie z průběhu kontroly DPS na zkratky a defekty.



Obr. 6.1: Foto z inspekce DPS

Prvotní oživení probíhalo přivedením napájení za napěťové regulátory. Tím byla ověřena funkčnost jednotlivých částí obvodu. Nejprve bylo napájecí napětí z laboratorního napěťového zdroje přivedeno na vodič spojující VP a VDIG z přílohy A.3. Spolu s tímto napětím bylo přivedeno napětí i na vodič sloužící jako WAKEUP (příloha A.4). Teoreticky bez použití regulátoru není napětí na WAKEUP vodiči nutné, a tak bylo toto napětí přivedeno jen jako jistota. Po rozsvícení signalizačních diod značících aktivní napájení byla

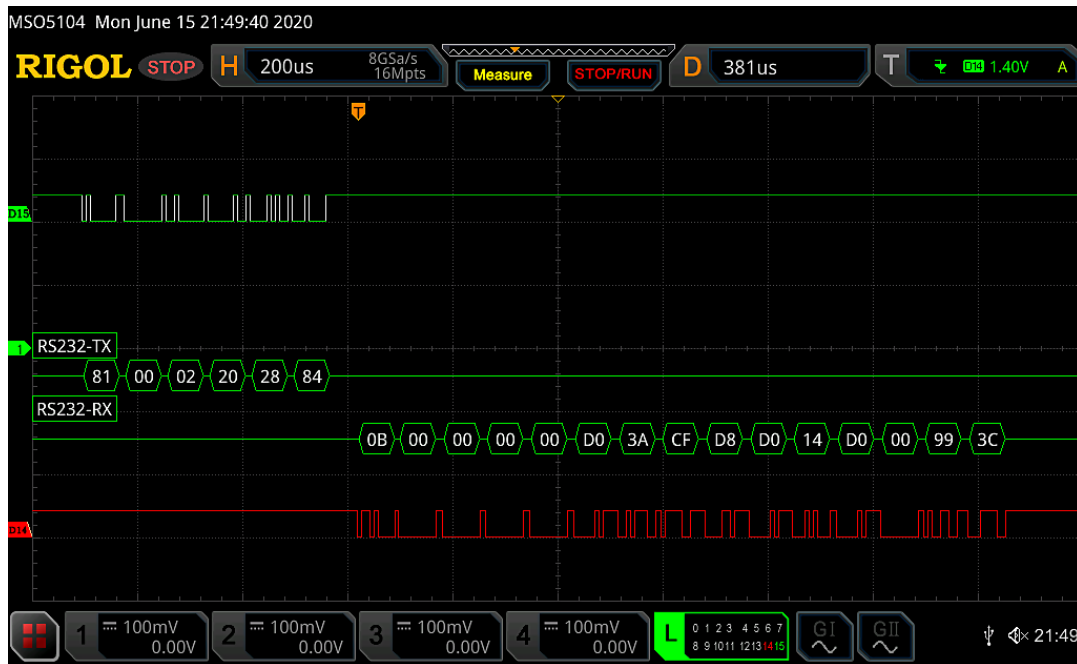
konstatována funkčnost a na řadu přišlo testování lineárních regulátorů jednotlivých modulů. Zde bylo napětí na WAKEUP vodiči podstatné. Moduly byly testovány nejprve jednotlivě a následně současně. K současnému otestování obou modulů bylo nutné napájet i komunikační vodiče. Jelikož nebyl při testování přítomen řídicí mikrokontrolér, jehož úloha je mimo jiné napájet komunikační vodič, bylo na VIO (příloha A.4 a A.5) přivedeno napětí z externího laboratorního zdroje. Na obrázku 6.2 jsou zachyceny obě popsané situace. Namísto akumulátorových článků byla při testování obou modulů použita pole rezistorů sloužící jako napěťové zdroje.



Obr. 6.2: Foto z prvotního oživení při testování jednoho modulu (vlevo) a obou modulů současně (vpravo)

Po úspěšném oživení následovalo usazení mikrokontroléru. V rámci experimentálního použití není mikrokontrolér integrován na DPS, ale je připojen přes konektory. To při prvotním návrhu usnadňuje návrh DPS a navíc je mikrokontrolér napájen přes USB port a lze tak určit, zda je případná chyba na straně BMS nebo mikrokontroléru. Do mikrokontroléru byla nahrána sekvence pro nastavení **bq76PL455A-Q1** (viz 5.2) a pomocí osciloskopu sledován komunikační tok. Při tomto procesu bylo odladěno časování. Příjem dat signalizuje mikrokontrolér blikáním modré LED diody. V případě chybného příjmu dojde k rozsvícení červené diody a zastavení programu v nekonečné smyčce. V další verzi programu bude v jednotlivých „chybových“ smyčkách ošetření chyby a odpadne tak potřeba obvod resetovat. Na obrázku 6.3 je zachycen průběh poslaných a přijatých dat. Signál na sondě označen jako D15 je odchozí signál (Tx z pohledu mikrokontroléru). D14 je pak příchozí signál (Rx z pohledu mikrokontroléru).

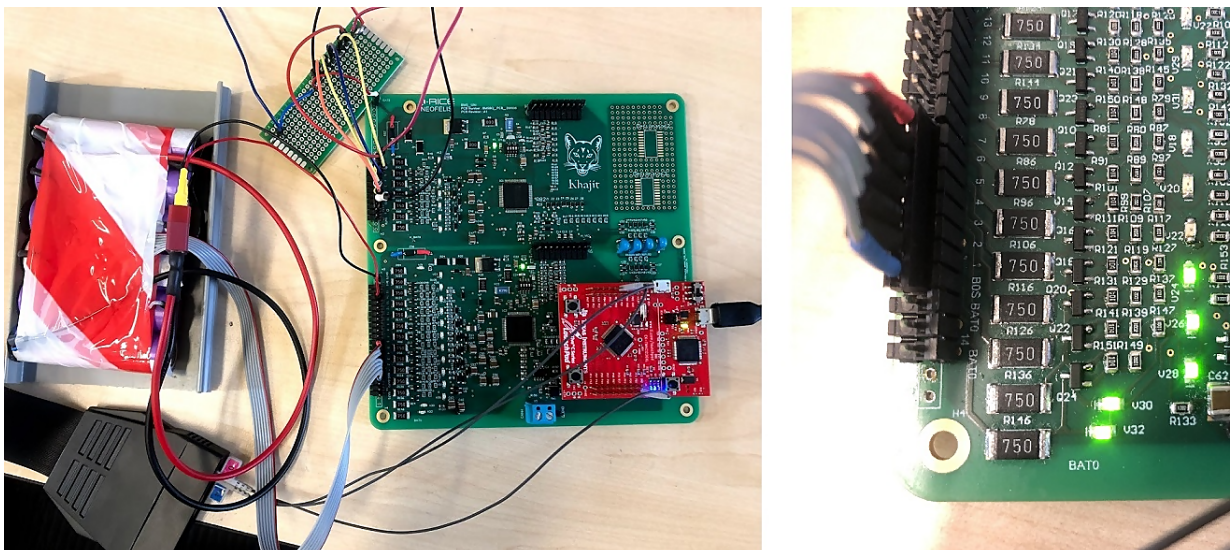
Při dekódování odchozí zprávy lze určit, že se jedná o příkaz pro jeden modul s adresou 0 (první) a je očekávána odpověď. Jedná se o požadavek navzorkovaných hodnot od BMS



Obr. 6.3: Zachycení obrazovky při příjmu dat na základě příkazu

obvodu. V tomto případě je z hlediska velikosti FIFO zásobníku (16 bytů) monitorováno naráz pouze 6 článků. Které články jsou měřeny je cyklicky nastavováno v registru při procesu měření. Odpovědí je 15 bytů dat s hodnotami napětí na člancích. Pro podrobnější popis datových zpráv viz 5.1.6.

Pro účely testování balancovacího algoritmu bylo do série spojeno 6 Li-ion článků. Fotografie z průběhu funkce a při sepnutí balancovacích tranzistorů jsou na obrázku 6.4.



Obr. 6.4: Obvod BMS při měření napětí na člancích (vlevo), aktivní balancovací tranzistory (vpravo)

Závěr

Tato diplomová práce si klade za cíl návrh softwaru určeného pro jednotku řízení akumulátorů, která bude sloužit v rámci testování elektrických vozidel jako subjektů projektů katedry KEV. Vzhledem k nedostatečné kvalitě návrhu hardwaru, na kterém měl být původně software vyvíjen, byl součástí práce taktéž návrh a konstrukce obvodu jednotky řízení akumulátorů.

V kapitole 1 byly uvedeny základní pojmy, které jsou při použití elektrochemických zdrojů relevantní. V této kapitole byly také popsány Li-ion akumulátory vzhledem k zaměření projektu na tento typ akumulátorových článků včetně závislosti kapacity na teplotě, samovybíjení, chemického složení a konstrukčního provedení.

Kapitola 2 se zabývá definicí pojmu Battery Management System, výhodami, které z jeho využití vyplývají a je v ní popsáno balancování akumulátorových článků, rozdíl mezi aktivním a pasivním balancováním spolu s výhodami a nevýhodami jednotlivých zástupců typů balancování. V poslední sekci kapitoly jsou vypsána dostupná řešení jednotek pro správu bateriových akumulátorů v podobě integrovaných obvodů. Ty jsou následně porovnány a je vybráno nejvhodnější řešení. Tím se stal obvod **bq76PL455A-Q1**, který umožňuje měřit a spravovat až 16 článků, disponuje ochrannými prostředky v podobě nadproudové ochrany, sebetestování, teplotní ochrany a poskytuje široké možnosti jednoduchého rozšíření díky univerzálnímu charakteru. To podporuje splnění třetího bodu zadání, ve kterém se objevuje požadavek na snadnou úpravu obvodu v případě nutnosti úpravy hardwaru.

Prvním bodem zadání diplomové práce je seznámení se s navrženou elektronikou obvodu pro správu bateriových akumulátorů. Popis jednotlivých částí obvodu je v kapitole 3. Vzhledem k nutnosti návrhu desky plošných spojů BMS obvodu bylo seznámení se s jednotlivými částmi obvodu relativně důkladné od vnějších částí obvodu až po vnitřní spolu s možnostmi zapojení jednotlivých modulů do architektury.

Ve stejné kapitole je též popsán postup při návrhu softwaru. Je zde popsána komunikace UART, funkční stavy obvodu pro BMS, diferenciální komunikace mezi moduly, zvolený řídicí mikrokontrolér, jednotlivé registry obvodu a formát vysílacích rámců. Kapitola 3 dále pokračuje popisem programu od inicializace periférií mikrokontroléru až po balancování akumulátorových článků včetně způsobů odvození stavu nabití baterie. Splnění čtvrtého bodu zadání zde zastupuje část o nastavování registrů pro příznaky chyb pomocí GPIO pinů mikrokontroléru, přičemž je v případě chyby například omezeno ba-

lancování článků.

V rámci druhého bodu zadání byl v kapitole 4 sepsán výčet pravidel soutěže orientující se na software. Poznatky z těchto pravidel byly implementovány do softwarové části diplomové práce.

Celý projekt byl náležitě odzkoušen v na experimentálním modelu v laboratoři s akumulátorovými články a lze konstatovat, že je plně funkční. Celým procesem ožívání se zabývá kapitola 6. V dalších fázích projektu by bylo vhodné vyvinout software sloužící jako grafická nadstavba pro uživatele a zřehlednění přenosu dat, která jsou doposud posílána přes sériovou linku do terminálu počítače.

Literatura

- [1] HAMMERBAUER, J. *Učební texty k předmětu KAE/ENZ*. [online] [cit. 27. 12. 2019].
- [2] OČENÁŠEK, J. *Systém správy Li-Ion baterií*. Plzeň, 2018. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. [cit. 27. 12. 2019].
- [3] KŘIBSKÝ, P. *Metody odhadu stavu nabití Li-Ion akumulátorů*. Plzeň, 2016. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. [cit. 27. 12. 2019].
- [4] ZHANG, Ruifeng, XIA, Bizhong, LI, Baohua a další. *A Study on the Open Circuit Voltage and State of Charge Characterization of High Capacity Lithium-Ion Battery Under Different Temperature*. *energies*, 2018. 1-17. [online] [cit. 27. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/9/2408/pdf>
- [5] BENVENISTE, G., H. RALLO, L. CANALS CASALS, A. MERINO a B. AMANTE. *Comparison of the state of Lithium-Sulphur and lithium-ion batteries applied to electromobility*. *Journal of Environmental Management* [online]. 2018, 226, 1-12 [cit. 2020-06-04]. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.08.008. ISSN 03014797. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479718308776>
- [6] *Prismatic Pouch Packs*. New Bedford: epec, 2016. [online] [cit. 27. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.epectec.com/batteries/prismatic-pouch-packs.html>
- [7] *Types of battery cells* Vancouver: Battery University, 2011. [online] [cit. 30. 12. 2019]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_battery_cells
- [8] *BU-802b: What does Elevated Self-discharge Do?* Vancouver: Battery University, 2011. [online] [cit. 30. 12. 2019]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/elevating_self_discharge
- [9] *LTO Batteries*. AA Portable Power Corp. [online] [cit. 15. 6. 2020]. Dostupné z: <https://www.batteryspace.com/Lithium-Titanate-Battery.aspx>
- [10] *Li-ion Battery and Gauge Introduction* Taiwan: RICHTEK, 2014. [online] [cit. 30. 12. 2019]. Dostupné z: <https://www.richtek.com/Design%20Support/Technical%20Document/AN024>

- [11] NUAMAH, Ch. *A Simple Comparison of Six Lithium-ion Battery Types* Owlcation, 2017. [online] [cit. 30. 12. 2019]. Dostupné z: <https://owlcation.com/stem/Comparing-6-Lithium-ion-Battery-Types>
- [12] PETR, K. *Kladné elektrody pro lithno-iontové akumulátory na bázi LiCoO₂*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] BENEŠ, L., MELÁNOVÁ, K., SVOBODA, J., ZIMA, V. *Intercalation chemistry of layered vanadyl phosphate: a review*. J. Incl. Phenom. Macrocycl. Chem., 2012 [cit. 31. 12. 2019]. 73. str. 33-53.
- [14] Mánek, J. *Návrh systému pro správu baterií (BMS) pro elektrickou formuli*. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [15] DOSTÁL, O. *Bateriový management soustavy trakčních lithiových baterií*. Plzeň, 2016. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [16] *Datasheet MC33772B*. Eindhoven: Nizozemsko, 2018. [online] [cit. 18. 3. 2019]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MC33772B'SDS.pdf>
- [17] *Datasheet ISL78714*. Tokio: Japonsko, 2019. [online] [cit. 26. 3. 2020]. Dostupné z: <https://www.renesas.com/eu/en/www/doc/datasheet/isl78714.pdf>
- [18] Robenek, J. *ISL78714 dohlíží na baterie. Počítá je na stovky*. In: dps-az.cz [online] 2019-10-4 [cit. 26. 3. 2020].
- [19] *Datasheet bq76PL455A*. Texas: Texas Instruments, 2016. [online] [cit. 26. 3. 2020]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq76pl455a-q1.pdf>
- [20] *bq76PL455A-Q1 Design Recommendations*. Texas: Texas Instruments, 2016. [online] [cit. 31. 3. 2020]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slua791a/slua791a.pdf>
- [21] *bq76PL455A-Q1 Use-Case Scenarios* Texas: Texas Instruments, 2016. [online] [cit. 9. 4. 2020]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slua785/slua785.pdf>
- [22] *UART (USART) – komunikujte sériově po dvou vodičích*. ZAVAVOV, 2014. [online] [cit. 16. 4. 2020]. Dostupné z: <http://www.zavavov.cz/cz/elektrotechnika/komunikacni-sbernice/67-uart-usart-komunikujte-seriove-po-dvou-vodicich/>
- [23] RAGHVENDRA, N. *UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter.) Communication* Electricalfundablog.com, 2014. [online] [cit. 16. 4. 2020]. Dostupné z: <https://electricalfundablog.com/uart-universal-asynchronous-receiver-transmitter-communication/>

- [24] *An Introduction to the Tiva™ C Series Platform of Microcontrollers*. Texas: Texas Instruments, 2016. [online] [cit. 3. 5. 2020]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/wp/spmy010/spmy010.pdf?ts=1588528956884>
- [25] *bq76PL455A-Q1 Software Design Reference*. Texas: Texas Instruments, 2016. [online] [cit. 17. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/slva617a/slva617a.pdf?&ts=1589740514822>
- [26] *Tiva™ C Series TM4C123GH6PM Microcontroller Data Sheet datasheet*. Texas: Texas Instruments, 2016. [online] [cit. 17. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tm4c123gh6pm.pdf?&ts=1589743995498>
- [27] *Formula Student Rules 2020*. SAE International, 2020. [online] [cit. 29. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DownloadDocument.aspx?DocumentID=1b6bda52-48d0-4286-931d-c9418165fd3e>
- [28] *Lithium-Ion State of Charge (SoC) measurement*. PowerTech, 2020. [online] [cit. 30. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.powertechsystems.eu/home/tech-corner/lithium-ion-state-of-charge-soc-measurement/>
- [29] *Microcontroller simplifies battery-state-of-charge measurement* AspenCore, 2006. [online] [cit. 30. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.edn.com/microcontroller-simplifies-battery-state-of-charge-measurement/>
- [30] KOSTURIK, K. *Učební texty k předmětu KAE/RIS*. [online] [cit. 30. 5. 2020].
- [31] S. M. HOSSEINI MOGHADDAM. *Designing battery thermal management systems (BTMS) for cylindrical Lithium-ion battery modules using CFD*. Stockholm, 2018. Disertační práce. School of Industrial Engineering and Management (ITM) [online] [cit. 10. 6. 2020]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1290856&dswid=4057>
- [32] *UWB Racing*. Plzeň. Západočeská univerzita v Plzni. [online] [cit. 13. 6. 2020]. Dostupné z: <http://uwbracing.cz/>
- [33] PIAO, WANG, CAO, ZHANG a LU. *Lithium-Ion Battery Cell-Balancing Algorithm for Battery Management System Based on Real-Time Outlier Detection*. *Mathematical Problems in Engineering*. Praha, 2015. [online] [cit. 13. 6. 2020]. DOI: 10.1155/2015/168529. ISSN 1024-123X. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2015/168529/>
- [34] XIONG, R., SHEN, W. *Advanced Battery Management Technologies for Electric Vehicles*. Praha, 2019. [cit. 13. 6. 2020]. ISBN 978-1-119-48164-5.

Příloha A

Schémata zapojení, DPS

A.1 Vstupní část

A.2 Napájecí část

A.3 Zapojení prvního modulu

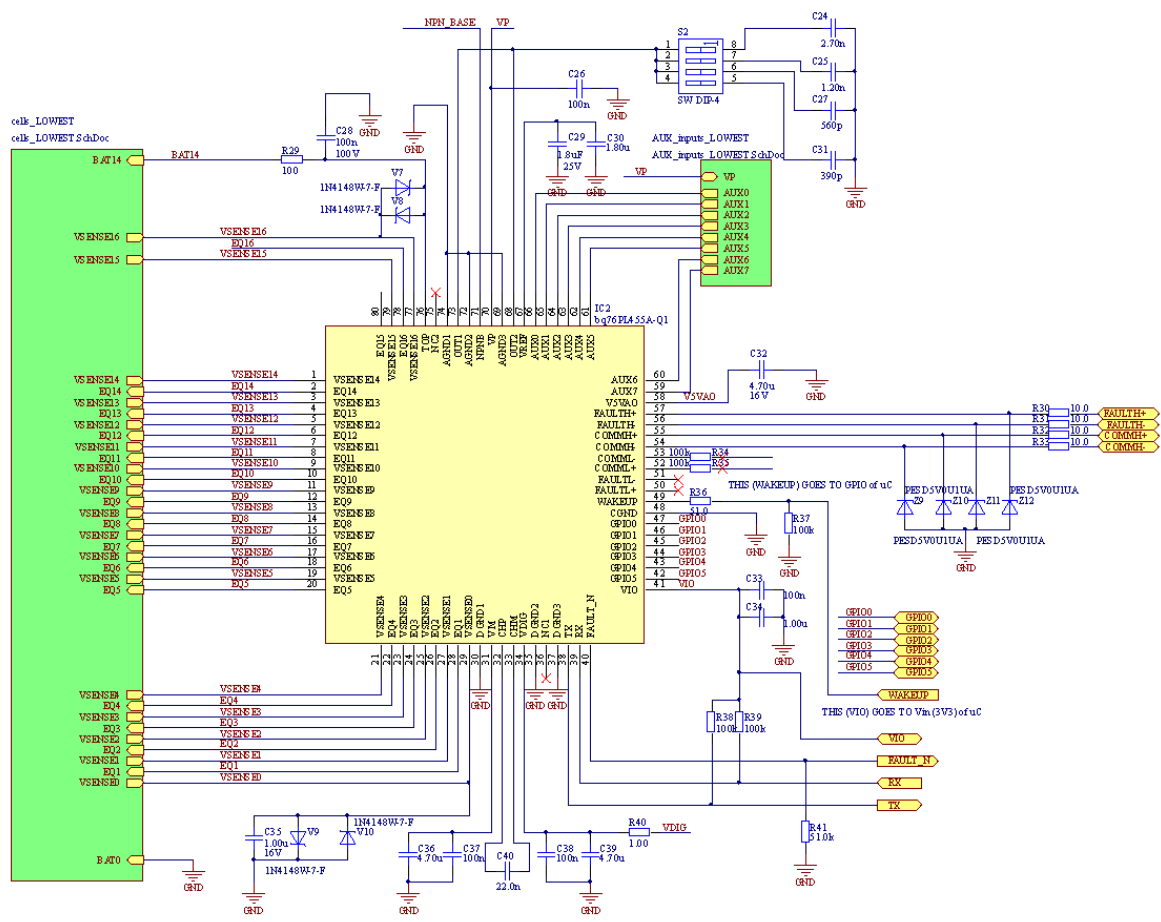
A.4 Zapojení druhého modulu

A.5 Měřicí AUX vstupy

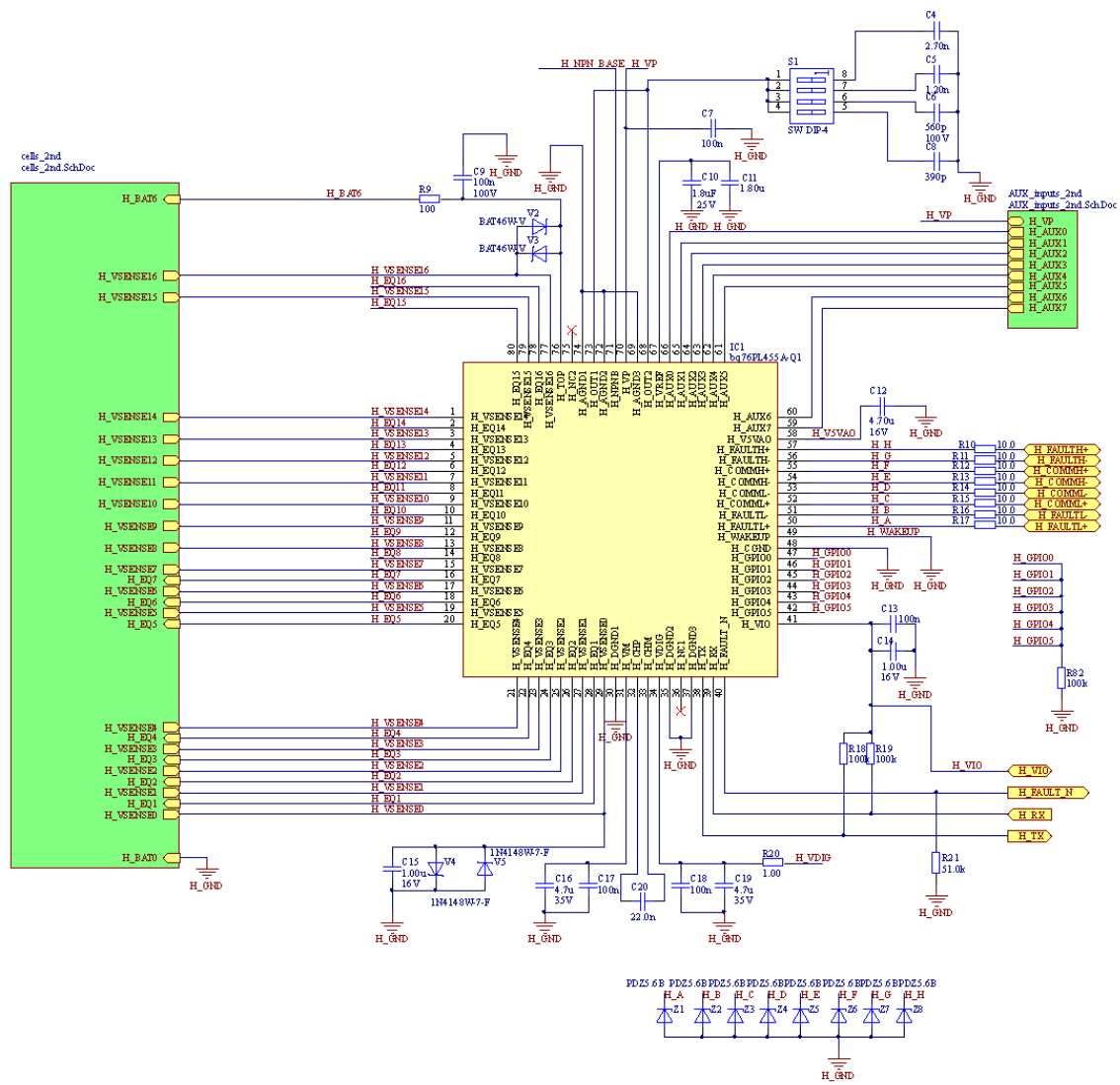
A.6 Konektory mikrokontroléru a budič CAN

A.7 Návrh desky plošných spojů

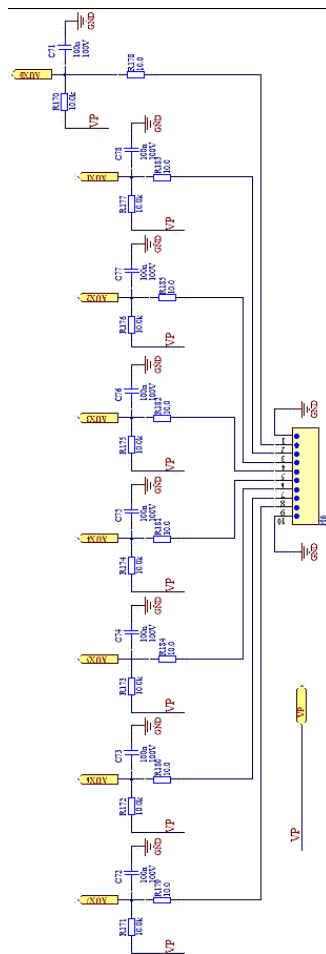
A.8 3D render



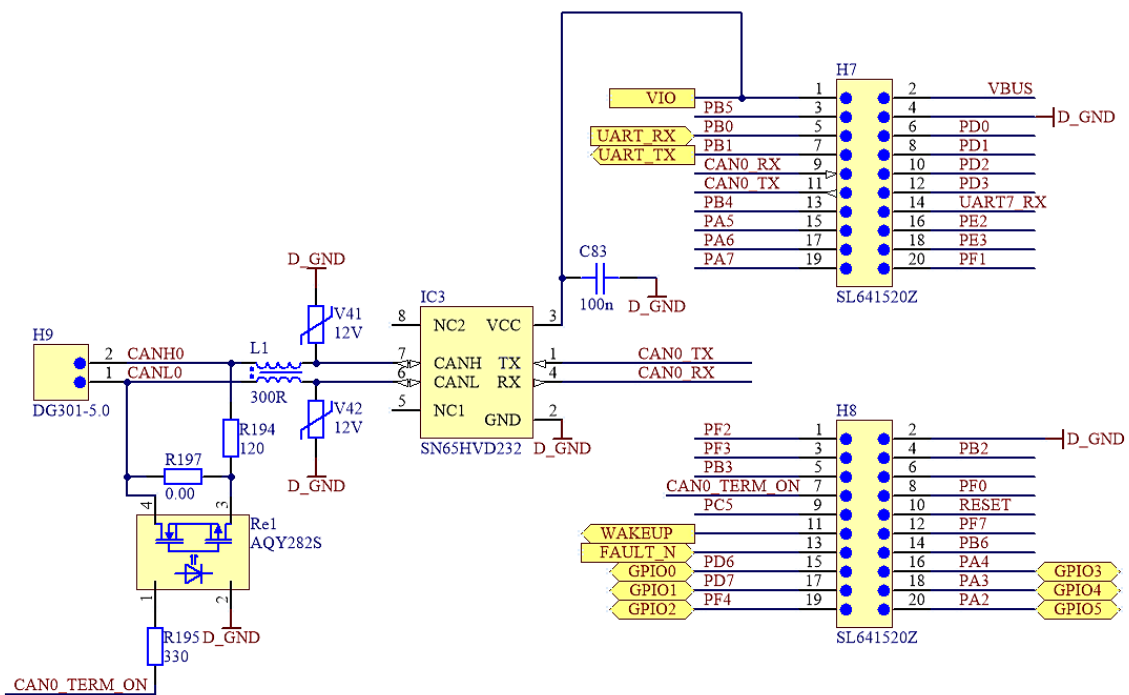
Obr. A.4: Zapojení prvního modulu obvodu BQ76PL455A-Q1



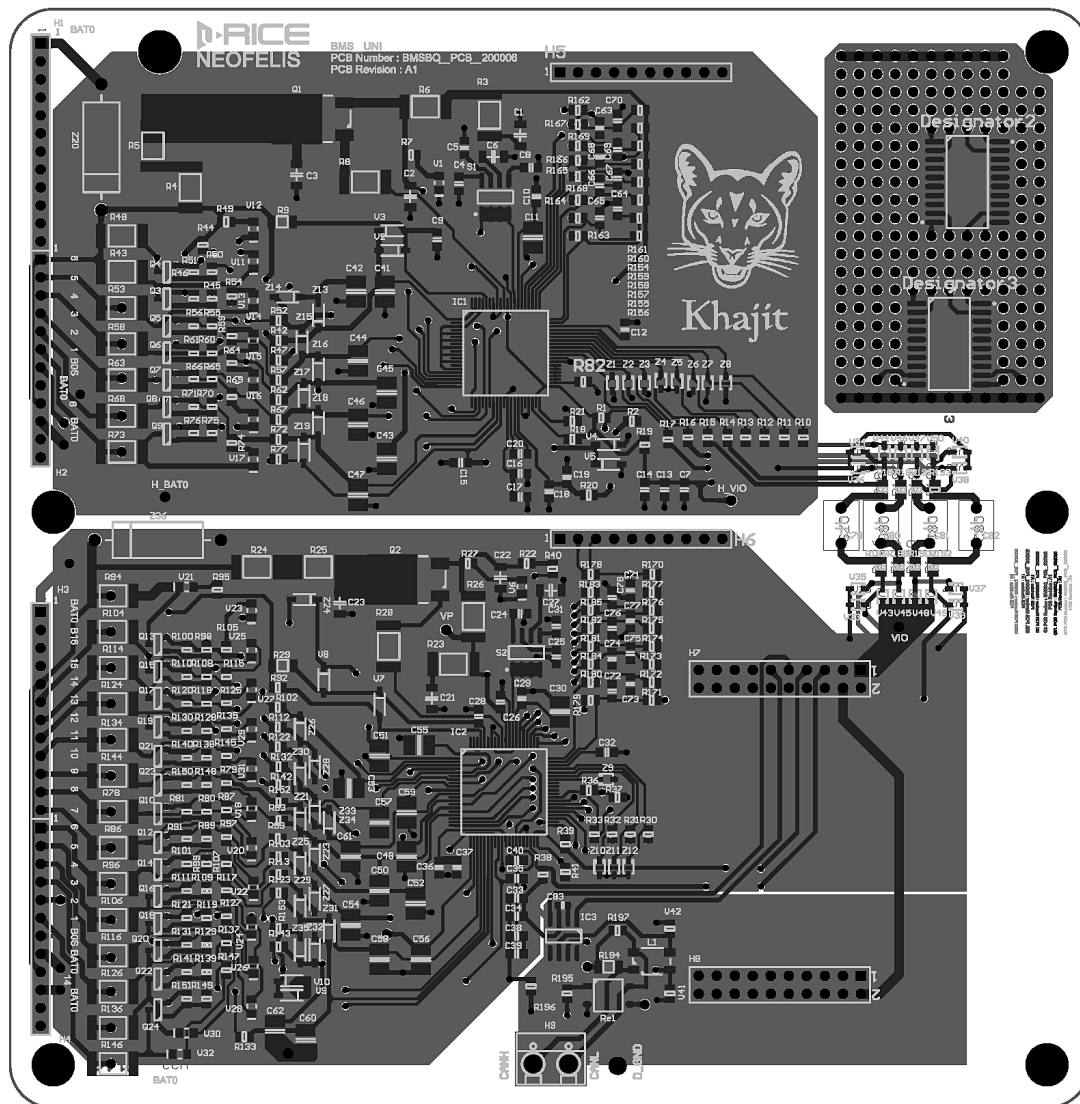
Obr. A.5: Zapojení druhého modulu obvodu BQ76PL455A-Q1



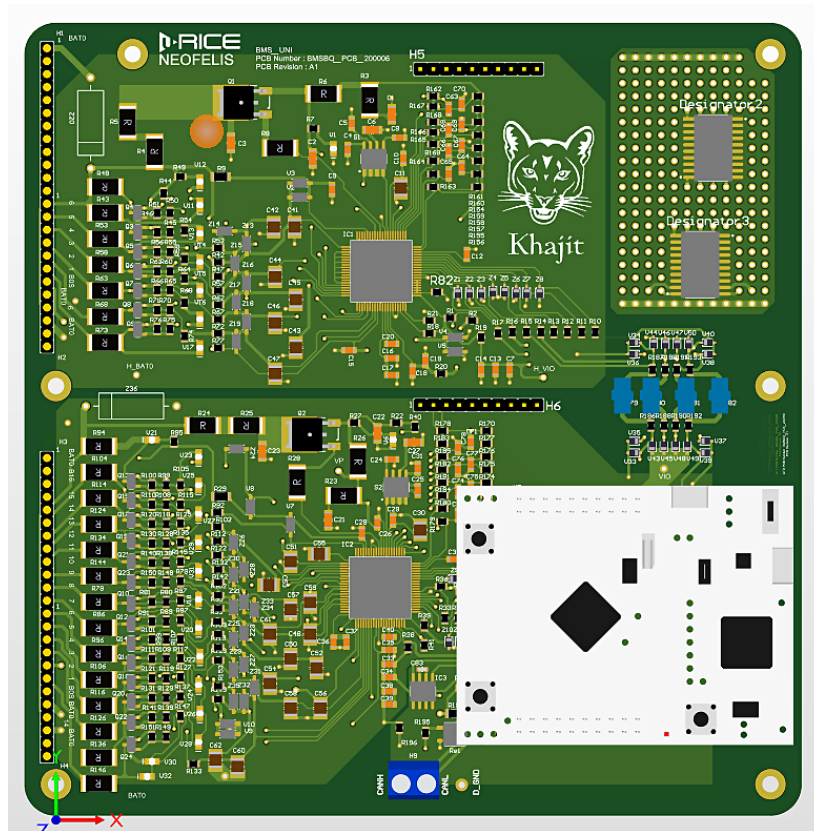
Obr. A.6: Zapojení měřících AUX vstupů pro měření teplot



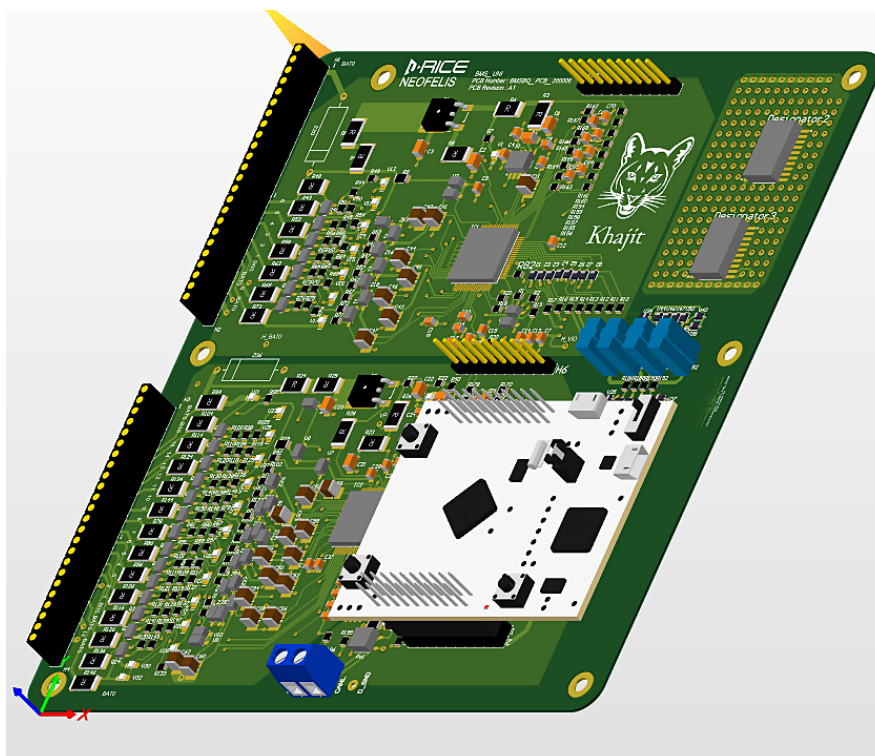
Obr. A.7: Zapojení rozhraní pro řídicí mikrokontrolér a budiče CAN



Obr. A.8: Návrh desky plošných spojů



Obr. A.9: 3D render DPS



Obr. A.10: 3D render DPS

Příloha B

Zdrojové kódy

B.1 WriteReg.c

```
1 int WriteReg(BYTE bID, uint16_t wAddr, uint64_t dwData, BYTE bLen, BYTE bWriteType)
2 {
3     int bRes = 0;
4     BYTE bBuf[4] = {0, 0, 0, 0};
5     switch(bLen)
6     {
7     case 1:
8         bBuf[0] = dwData & 0x00000000000000FF;
9         bRes = WriteFrame(bID, wAddr, bBuf, 1, bWriteType);
10        break;
11    case 2:
12        bBuf[0] = (dwData & 0x000000000000FF00) >> 8;
13        bBuf[1] = dwData & 0x00000000000000FF;
14        bRes = WriteFrame(bID, wAddr, bBuf, 2, bWriteType);
15        break;
16    case 3:
17        bBuf[0] = (dwData & 0x0000000000FF0000) >> 16;
18        bBuf[1] = (dwData & 0x000000000000FF00) >> 8;
19        bBuf[2] = dwData & 0x00000000000000FF;
20        bRes = WriteFrame(bID, wAddr, bBuf, 3, bWriteType);
21        break;
22    case 4:
23        bBuf[0] = (dwData & 0x00000000FF000000) >> 24;
24        bBuf[1] = (dwData & 0x0000000000FF0000) >> 16;
25        bBuf[2] = (dwData & 0x000000000000FF00) >> 8;
26        bBuf[3] = dwData & 0x00000000000000FF;
27        bRes = WriteFrame(bID, wAddr, bBuf, 4, bWriteType);
28        break;
29    case 5:
30        bBuf[0] = (dwData & 0x000000FF00000000) >> 32;
31        bBuf[1] = (dwData & 0x00000000FF000000) >> 24;
32        bBuf[2] = (dwData & 0x0000000000FF0000) >> 16;
33        bBuf[3] = (dwData & 0x000000000000FF00) >> 8;
34        bBuf[4] = dwData & 0x00000000000000FF;
35        bRes = WriteFrame(bID, wAddr, bBuf, 5, bWriteType);
36        break;
37    case 6:
38        bBuf[0] = (dwData & 0x0000FF0000000000) >> 40;
39        bBuf[1] = (dwData & 0x000000FF00000000) >> 32;
40        bBuf[2] = (dwData & 0x00000000FF000000) >> 24;
41        bBuf[3] = (dwData & 0x0000000000FF0000) >> 16;
42        bBuf[4] = (dwData & 0x000000000000FF00) >> 8;
43        bBuf[5] = dwData & 0x00000000000000FF;
44        bRes = WriteFrame(bID, wAddr, bBuf, 6, bWriteType);
45        break;
46    case 7:
47        bBuf[0] = (dwData & 0x00FF000000000000) >> 48;
48        bBuf[1] = (dwData & 0x0000FF0000000000) >> 40;
49        bBuf[2] = (dwData & 0x000000FF00000000) >> 32;
```

```

50         bBuf[3] = (dwData & 0x00000000FF000000) >> 24;
51         bBuf[4] = (dwData & 0x0000000000FF0000) >> 16;
52         bBuf[5] = (dwData & 0x000000000000FF00) >> 8;
53         bBuf[6] = dwData & 0x00000000000000FF;
54         bRes = WriteFrame(bID, wAddr, bBuf, 7, bWriteType);
55         break;
56     case 8:
57         bBuf[0] = (dwData & 0xFF00000000000000) >> 56;
58         bBuf[1] = (dwData & 0x00FF000000000000) >> 48;
59         bBuf[2] = (dwData & 0x0000FF0000000000) >> 40;
60         bBuf[3] = (dwData & 0x000000FF00000000) >> 32;
61         bBuf[4] = (dwData & 0x00000000FF000000) >> 24;
62         bBuf[5] = (dwData & 0x0000000000FF0000) >> 16;
63         bBuf[6] = (dwData & 0x000000000000FF00) >> 8;
64         bBuf[7] = dwData & 0x00000000000000FF;
65         bRes = WriteFrame(bID, wAddr, bBuf, 8, bWriteType);
66         break;
67     default:
68         break;
69     }
70     return bRes;
71 }

```

B.2 WriteFrame.c

```

1
2 int WriteFrame(BYTE bID, uint16_t wAddr, BYTE * pData, BYTE bLen, BYTE bWriteType)
3 {
4     int          bPktLen = 0;
5     BYTE        pFrame[32];
6     BYTE *      pBuf = pFrame;
7     uint16_t    wCRC;
8     int32_t     ui32index = 0;
9
10
11     if (bLen == 7 || bLen > 8)
12         return 0;
13
14     memset(pFrame, 0x7F, sizeof(pFrame));
15     if (wAddr > 255)
16     {
17         *pBuf++ = 0x88 | bWriteType | bLen;          // use 16-bit address
18         if (bWriteType == FRMWRT_SGL_R || bWriteType == FRMWRT_SGL_NR
19             || bWriteType == FRMWRT_GRP_R || bWriteType == FRMWRT_GRP_NR)
20             //(bWriteType != FRMWRT_ALL_NR)
21             //(bWriteType != FRMWRT_ALL_R))
22         {
23             *pBuf++ = (bID & 0x00FF);
24         }
25         *pBuf++ = (wAddr & 0xFF00) >> 8;
26         *pBuf++ = wAddr & 0x00FF;
27     }
28     else {
29         *pBuf++ = 0x80 | bWriteType | bLen;          // use 8-bit address
30         if (bWriteType == FRMWRT_SGL_R || bWriteType == FRMWRT_SGL_NR
31             || bWriteType == FRMWRT_GRP_R || bWriteType == FRMWRT_GRP_NR)
32         {
33             *pBuf++ = (bID & 0x00FF);
34         }
35         *pBuf++ = wAddr & 0x00FF;
36     }
37
38     while(bLen--)
39         *pBuf++ = *pData++;
40
41     bPktLen = pBuf - pFrame;
42
43     wCRC = CRC16(pFrame, bPktLen);
44     *pBuf++ = wCRC & 0x00FF;
45     *pBuf++ = (wCRC & 0xFF00) >> 8;
46     bPktLen += 2;

```

```
46
47
48     for(ui32index = 0 ; ui32index < bPktLen ; ui32index++)
49     {
50         UARTCharPut(UART1_BASE, pFrame[ui32index]);
51     }
52
53     delayms(1);
54
55     return bPktLen;
56
57 }
58 }
59
60
```