

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

System pro monitorování stavu Li-Ion akumulátorů

Tomáš Havel

Školitel: Doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka
Květen 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Havel** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **474771**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Systém pro monitorování stavu Li-Ion akumulátorů

Název bakalářské práce anglicky:

System for monitoring Li-Ion accumulators

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte elektronický systém (BMS) pro pěti článkovou baterii Li-Ion akumulátorů velikosti 18650. BMS musí monitorovat a zajišťovat bezporuchový provoz baterie i jednotlivých článků. Systém by měl zajišťovat následující činnosti:

1. Ochranu proti podpětí (vybití pod danou úroveň), přepětí (nabytí nad danou úroveň) a nadproudu.
2. Automatický reset chybových stavů při pomnutí výše uvedených stavů.
3. Monitoring stavu baterie včetně teploty a odhad míry nabití (SOC).

Navrhněte obvodové řešení systému a dle pokynu zadávajícího je realizujte na desce plošných spojů včetně řídicího software. Zvolte vhodnou metodu pro odhad stavu nabití, kterou implementujte spolu s monitoringem baterie. Řešení by mělo umožňovat přenos informací do nadřazeného systému prostřednictvím komunikace po sériové lince.

4. Pasivní balancování článků při nabíjení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Reiner Korthauer (Ed.): Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications, Springer 1st ed. 2018, ISBN-13: 978-3662530696
- [2] Yuping Wu (Ed.): Lithium-Ion Batteries: Fundamentals and Applications, CRC Press 2015, ISBN: 9781466557338.
- [3] J. Pinker: Mikroprocesory a mikropočítače, BEN - technická literatura, 2004, ISBN 80-7300-110-1
- [4] B. Mann: C pro mikrokontroléry, BEN - technická literatura, 2003, 80-7300-077-6
- [5] Texas Instruments BQ77915: Ultra-Low-Power Primary Protector With Autonomous Cell Balancing, [cit. 17. 1. 2020]. Dostupné na: <http://www.ti.com/product/BQ77915>
- [6] Microchip ATSAM21E18: A low-power, high-performance ARM® Cortex®, [cit. 17. 1. 2020]. Dostupné na: <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATSAMD21E18>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka, katedra teorie obvodů FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **20.01.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **22.05.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Doc. Dr. Ing. Jiřímu Hospodkovi za vedení práce a poskytnutí přínosných konzultací. Zároveň bych rád poděkoval celé své rodině za podporu při studiu a tvorbě práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

V Praze, 14. května 2020

Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem systému pro ochranu a monitorování stavu baterie složené z pěti akumulátorů Li-Ion 18650. Součástí práce je teoretický návrh obvodu, realizace navrženého zařízení v podobě desky plošných spojů a následně otestování jednotlivých funkcí zařízení. Realizované zařízení disponuje ochranou pěti sériově zapojených akumulátorů Li-Ion s implementovaným pasivním balancováním, monitorováním jednotlivých veličin baterie (napětí baterie, vybíjecí/nabíjecí proud a teplota) a odhadem míry nabití. Naměřené veličiny jsou následně pomocí sériové komunikace zasílány do počítače a zpracovány navrženou aplikací.

Klíčová slova: Battery management systém, baterie, článek, balancování, míra nabití, deska plošných spojů

Školitel: Doc. Dr. Ing. Jiří Hospodka
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra teorie obvodů

Abstract

The aim of this thesis is to design a system able to protect and monitor a five-cell Li-Ion battery. The thesis consists of a theoretical circuit design, implementation of a device in the form of printed circuit board and a final testing of all the functions of the implemented device. The device is able to fully protect five-cell Li-Ion battery, passively balance voltage of individual cells, monitor battery voltage, charging/discharging current and battery temperature. Based on the measured values, the device is able to estimate state of charge, which is with the measured values sent via serial communication to computer, where the data are processed by implemented application.

Keywords: Battery management system, battery, cell, balancing, state of charge, printed circuit board

Title translation: System for monitoring Li-Ion accumulators

Obsah

1 Úvod	1	
2 Teoretická část	3	
2.1 Li-Ion Akumulátory 18650	3	
2.2 Ochrana článků baterie	4	
2.3 Bloky ochranného obvodu	4	
2.3.1 Řídící obvod BMS	5	
2.3.2 Blok měření napětí článků	5	
2.3.3 Proudový senzor	7	
2.3.4 Teplotní senzor	8	
2.3.5 Spínač obvodu	10	
2.4 Balancování článků baterie	10	
2.4.1 Baterie bez balanceru	10	
2.4.2 Baterie s balancerem	11	
2.5 Odhad míry nabití (SOC)	12	
2.5.1 Metoda aproximace SOC pomocí napětí baterie	12	
2.5.2 Aproximace SOC pomocí změny náboje baterie	13	
2.6 Komunikace	14	
2.6.1 USB	14	
2.6.2 RS-232	14	
2.6.3 Převodník UART-USB	14	
3 Návrh vlastního řešení	15	
3.1 Požadavky zadání	15	
3.2 Návrh ochranné části obvodu	15	
3.2.1 Výběr řídicího obvodu BMS	15	
3.2.2 Výběr senzorů pro ochrannou část BMS	16	
3.2.3 Návrh balancování	17	
3.2.4 Výběr spínače obvodu	18	
3.3 Návrh komunikační části obvodu	19	
3.3.1 Výběr napěťového regulátoru pro mikrokontrolér	19	
3.3.2 Výběr komunikačního mikrokontroléru	20	
3.3.3 Monitorování analogových veličin	21	
3.3.4 Řešení fyzické vrstvy komunikace	24	
4 Realizace návrhu a ověření funkčnosti	27	
4.1 Realizace obvodového návrhu	27	
4.2 Realizace desky plošných spojů	27	
4.3 Realizace softwarové části zařízení	29	
4.3.1 Implementace odhadu míry nabití	29	
4.3.2 Komunikační protokol	30	
4.3.3 Počítačová aplikace	30	
4.4 Ověření funkcí realizovaného zařízení	31	
4.4.1 Testování detekce podpětí	31	
4.4.2 Testování detekce přepětí	32	
4.4.3 Testování detekce nadproudu	32	
4.4.4 Testování schopnosti balancování	33	
4.4.5 Testování konzistentnosti odhadu míry nabití	34	
4.4.6 Testování automatického resetu chybových stavů	34	
4.4.7 Měření přesnosti monitorovaných veličin	34	
5 Závěr	37	
Literatura	39	
6 Přílohy	43	

Obrázky

2.1 Blokové schéma ochrany článků baterie	4
2.2 Měření napětí článků pomocí diferenciálních zesilovačů.....	6
2.3 Měření napětí článků pomocí multiplexoru	6
2.4 Náčrt čtyřvývodového rezistoru [9]	8
2.5 Závislost odporu PT100 na teplotě [12]	8
2.6 Nebalancovaná baterie [15]	10
2.7 Blokové schéma pasivního balancování	11
2.8 Návrh aktivního balanceru firmy NXP [17]	12
2.9 Závislost napětí baterie na vybíjecím proudu [19]	13
3.1 Blokové schéma balančního obvodu	18
3.2 Blokové schéma spínače obvodu.	19
3.3 Schéma zapojení regulátoru	20
3.4 Schéma zapojení mikrokontroléru	21
3.5 Schéma zapojení měření napětí .	22
3.6 Schéma zapojení měření teploty	22
3.7 Schéma zapojení měření proudu	24
3.8 Schéma zapojení převodníku UART-USB	25
4.1 Deska plošných spojů	28
4.2 Svorkovnice desky plošných spojů	28
4.3 Diagram průběhu programu	29
4.4 Implementovaná počítačová aplikace	30
4.5 Cyklus vybíjení baterie	31
4.6 Cyklus nabíjení baterie	32
4.7 Napětí na shunt rezistoru	33
4.8 Ukázka dvou sepnutých balančních obvodů	33
6.1 Horní vrstva návrhu desky plošných spojů	43
6.2 Spodní vrstva návrhu desky plošných spojů	44
6.3 Obvodový návrh zapojení	45

Tabulky

2.1 Parametry akumulátoru Sony VTC5 [4]	3
3.1 Porovnání možností při výběru řídicího obvodu	16
3.2 Hraniční hodnoty proudu	17
3.3 Hraniční hodnoty napětí článků	17
3.4 Závislost odporu termistoru na teplotě [26].....	23
3.5 Maximální měřitelný nabíjecí/vybíjecí proud	24
4.1 Komunikační protokol	30
4.2 Konzistentnost odhadu SOC ...	34
4.3 Podmínky resetu chybového stavu	34
4.4 Ukázka porovnaných měření ...	35
4.5 Průměrná odchylka měření	35

Použité zkratky a symboly

BMS	Battery Management Systém
SOC	State Of Charge
DC	Direct Current
NiCd	Nikl-Kadmium
NiMh	Nikl-Metal hydrid
Li-ion	Lithium-Iont
AD	Analogově digitální
NTC	Negative Temperature Coefficient
PTC	Positive Temperature Coefficient
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter
USB	Universal Serial Bus
SPI	Serial Peripheral Interface
CAN	Controller Area Network
D-SUB	D-subminiature
LED	Light-Emitting Diode
COM	Communication port
I_B [mA]	balanční proud
$V_{DD_{ANA}}$ [A]	napájecí napětí analogové části
$U_{ADC_{res}}$ [mV]	rozlišení AD převodníku
U_B [V]	napětí celé baterie
R_{NTC} [Ω]	odpor termistoru NTC
T_{NTC} [$^{\circ}$ C]	teplota termistoru NTC
U_{OFF} [V]	offsetové napětí
R_{SH} [Ω]	odpor shunt rezistoru
U_{PA5} [V]	napětí na vstupu PA5
U_{PA6} [V]	napětí na vstupu PA6
U_{PA7} [V]	napětí na vstupu PA7

Kapitola 1

Úvod

V posledních dvou dekadách dochází k masivnímu nárůstu využití různých nabíjecích baterií v širokém spektru odvětví průmyslu. Od NiCd akumulátorů, které se vyznačují nízkou měrnou kapacitou a výrazným paměťovým efektem, přes NiMh akumulátory, jejichž paměťový efekt je zanedbatelný a oproti NiCd akumulátorům nastává výrazný nárůst poměru cena/výkon, až k Li-Ion článkům, které z uvedených typů článku nabízejí nejvyšší energetickou hustotu s velice nízkým samovybíjením a nulovým paměťovým efektem. [1]

V počátku byly Li-Ion akumulátory využívány především v přenosných zařízeních (mobilní telefony, notebooky apod.), následně tyto akumulátory ovládly trh s bateriově napájeným ručním náradím a v poslední dekádě našly uplatnění v nejnovějších elektromobilech. Pro prodloužení životnosti baterií, složených z těchto článků, je však nutná patřičná ochrana jednotlivých akumulátorů. Tato práce je zaměřena na vývoj a následnou realizaci ochranného a monitorovacího zařízení pro pětičlávkovou Li-Ion baterii.

Práce je rozdělena na tři dílčí části. První část se zabývá možnostmi při volbě jednotlivých ochranných komponentů a senzorů. Jednotlivé možnosti jsou stručně popsány a uvedeny jejich výhody a nevýhody. Druhá část práce je věnována návrhu teoreticky popsaného obvodu. Tato část je rozdělena na dvě podkapitoly, přičemž první se zabývá návrhem ochranné části obvodu a druhá částí obvodu, která má na starost monitorování veličin a jejich zaslání do nadřazeného systému. V poslední části je pak realizována deska plošných spojů, na které je následně otestována funkčnost jednotlivých funkcí navrhnutého obvodu.

Kapitola 2

Teoretická část

2.1 Li-Ion Akumulátory 18650

Li-Ion akumulátory typu 18650, kde 18 značí průměr 18 mm a 650 délku 650 mm, jsou v dnešní době jedny z nejpoužívanějších Li-Ion bateriových článků. Tyto akumulátory jsou lukrativní volbou, vzhledem k jejich vysoké kapacitě a kompaktním rozměrům [2]. S technologií Li-Ion však přichází úskalí, které je potřeba při práci s těmito články brát na vědomí.

- Klesne-li napětí akumulátoru pod určitou mez, akumulátor může být trvale poškozen bez možnosti opětovného nabití.
- Přesáhne-li napětí akumulátoru naopak horní hranici bezpečného napětí, může dojít k explozi celého článku.
- Je-li nabíjecí, či vybíjecí proud mimo meze uváděné výrobcem, hrozí přehřátí baterie vedoucí až k možné explozi.
- Je-li teplota akumulátoru příliš vysoká, dochází ke zkracování životnosti či případnému trvalému poškození akumulátoru. [3]

Elektrická kapacita, maximální nabíjecí a vybíjecí proud jsou parametry akumulátorů, které se liší v závislosti na výrobcu a modelu. Typickými hodnotami je maximální vybíjecí elektrický proud 10-30 A a elektrická kapacita od 2000 do 3500 mAh.

Ve zbytku práce bylo uvažováno a pracováno s akumulátory VTC5 od firmy Sony, která uvádí následující parametry:

	Sony VTC5
Nominální elektrická kapacita	2600 mAh
Nominální elektrické napětí	3.6 V
Maximální elektrické napětí	4.25 V
Maximální vybíjecí elektrický proud	20 A
Maximální nabíjecí elektrický proud	4 A

Tabulka 2.1: Parametry akumulátoru Sony VTC5 [4]

2.2 Ochrana článků baterie

Pro bezpečnou manipulaci a ochranu akumulátorů Li-Ion je nutné tyto akumulátory chránit před několika kritickými stavy. Z tohoto důvodu jsou vyvíjeny ochranné obvody, které se obecně nazývají Battery management systems (BMS) a jejich funkcí je monitorování, případně vyhodnocování stavu baterie [5]. Nejzákladnějšími monitorovanými parametry bývá:

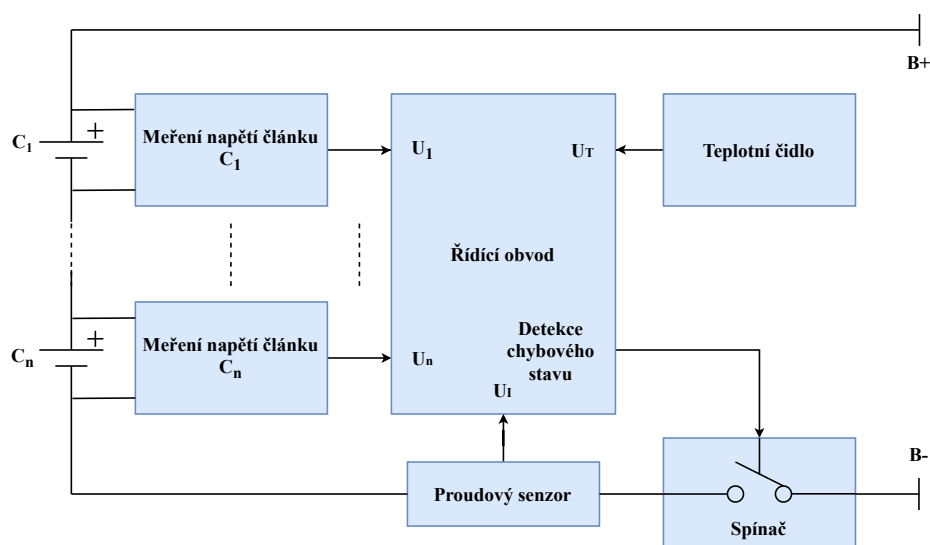
- napětí jednotlivých článků
- nabíjecí a vybíjecí proud
- teplota baterie

Na základně těchto parametrů řídicí obvod BMS vyhodnocuje několik chybových stavů. Při výskytu některého z chybových stavů BMS typicky odpojí baterii od zátěže či nabíječky. Základními chybovými stavy jsou:

- Přepětí a podpětí – napětí alespoň jednoho článku baterie opustilo bezpečný interval elektrického napětí.
- Nadproud a zkrat – nabíjecí či vybíjecí proud je příliš vysoký
- Vysoká teplota baterie – teplota baterie přesáhla bezpečnou mez

2.3 Bloky ochranného obvodu

Pro základní ochranu Li-Ion článků je zapotřebí několik hardwarových bloků. Uspořádání jednotlivých bloků je uvedeno na blokovém diagramu 2.1.



Obrázek 2.1: Blokové schéma ochrany článků baterie

■ 2.3.1 Řídící obvod BMS

Hlavním komponentem ochranné elektroniky je řídicí obvod, jenž přijímá data z okolních senzorů a na základě těchto dat zajišťuje bezporuchový provoz baterie. Při volbě tohoto obvodu se naskytují dvě základní možnosti:

■ Programovatelný mikrokontrolér

Volba programovatelného mikrokontroléru dává vývojáři větší volnost a možnost softwarové úpravy hraničních parametrů. Díky snadné úpravě těchto parametrů je BMS následně možné použít na širokou škálu bateriových článků a uživatel není limitovaný jedním typem.

Mikrokontrolér je třeba vybírat v závislosti na požadavcích aplikace. Důležitými parametry při výběru mikrokontroléru jako řídicího prvku BMS jsou:

- počet vstupů a výstupů
- rozlišení AD převodníku
- schopnost sériové komunikace
- spotřeba

■ Integrované obvody pro řízení BMS

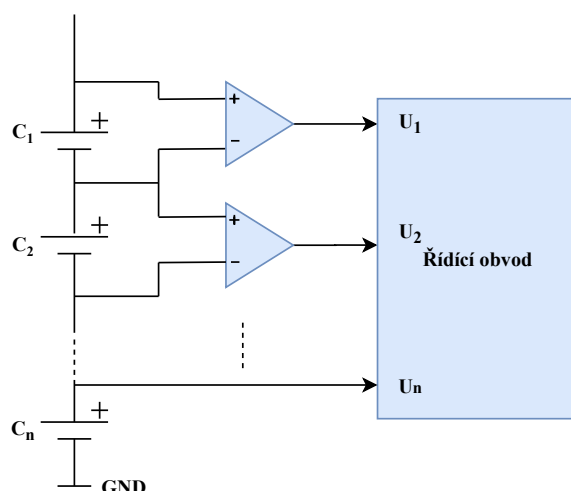
Integrované obvody pro řízení BMS jsou při návrhu ochranné elektroniky baterie jednodušší volbou. Výrobci typicky vyrábějí obvody určené pro konkrétní aplikaci s konkrétními integrovanými funkcemi, o které by se v případě použití mikrokontroléru musela starat jiná část obvodu. Integrované obvody určené pro použití při návrhu BMS bývají optimalizovány na velice nízkou spotřebu (odběrový proud v řádech μA) a disponují například integrovaným balancováním článků baterie. Mezi tyto integrované obvody patří například obvod BQ77915 (3-5 článků), DW01A (1 článek) či MAX1924 (3-4 články).

■ 2.3.2 Blok měření napětí článků

Jedním z důležitých monitorovaných parametrů je elektrické napětí jednotlivých článků baterie. Články v baterii nemají žádný společný potenciál, proto je třeba navrhnout obvod, který bude schopen měřit napětí jednotlivých článků.

■ Měření napětí článků baterie pomocí operačních zesilovačů

Pro měření napětí článků baterie lze použít operační zesilovače zapojené jako diferenciální zesilovače [6].

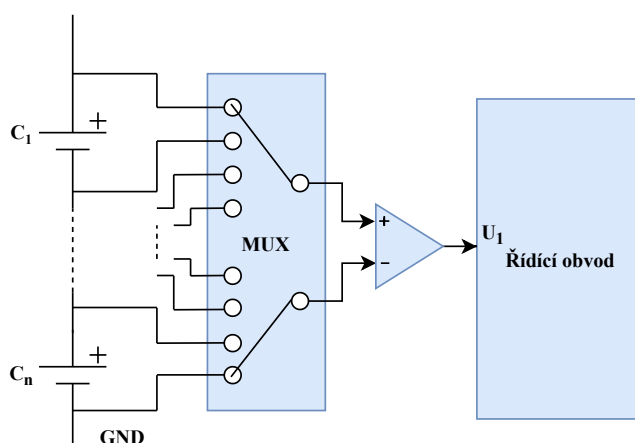


Obrázek 2.2: Měření napětí článků pomocí diferenciálních zesilovačů

Výhodou zapojení 2.2 je možnost implementace libovolného zesílení pouhou volbou rezistorů. Díky tomuto zapojení je možné napětí článků převést na libovolnou úroveň vhodnou pro řídicí obvod. Řídicí obvod následně musí disponovat alespoň stejným počtem vstupů jako je počet článků baterie.

■ Využití multiplexoru pro měření napětí článků baterie

Většina integrovaných obvodů, určených pro monitorování napětí článků baterie, pracuje na principu dvou výstupových multiplexorů [7]. Tento multiplexor musí mít pro každý výstup stejný počet vstupů jako je článků baterie, přičemž část odpovídající prvnímu výstupu má jednotlivé vstupy připojené na kladné vývody článků a druhá část naopak na vývody záporné. Řízením tohoto multiplexoru a využitím pouze jednoho diferenciálního operačního zesilovače je možné získat napětí na jednotlivých článcích baterie s využitím pouze jednoho vstupu mikrokontroléru.



Obrázek 2.3: Měření napětí článků pomocí multiplexoru

■ 2.3.3 Proudový senzor

Při výběru proudového senzoru je třeba brát v úvahu, že baterie jsou zdrojem stejnosměrného proudu, proto je třeba volit proudový senzor, jenž je schopen měřit stejnosměrný proud. Mezi dvě nejpoužívanější metody měření stejnosměrného proudu patří využití Hallova proudového senzoru, či měření úbytku napětí na takzvaném shunt rezistoru.

■ Hallův proudový senzor

Hallův proudový senzor je elektronická součástka, která přímo využívá tzv. Hallova jevu. Tato metoda je založena na faktu, že pokud vodičem protéká stejnosměrný proud, vzniká magnetické pole, které v Fe jádře indukuje magnetický tok. Protékáním magnetického toku polovodičovou destičkou vzniká Hallovo napětí, které je přímo úměrné protékajícímu elektrickému proudu a platí následující vztah. [8]

$$U = I \cdot B \cdot k \quad (2.1)$$

kde:

I je elektrický proud protékající vodičem

B je magnetická indukce způsobená magnetickým polem

k je konstanta zahrnující typ a tloušťku materiálu

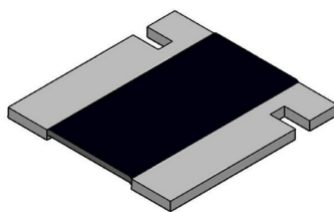
Měřené napětí U je však velmi malé, proto se často za Hallův senzor zařazuje zesilovač. Výhodou tohoto senzoru je jeho galvanické oddělení a velice malá závislost na teplotě.

■ Měření proudu pomocí úbytku napětí na rezistoru

Metoda měření proudu pomocí úbytku napětí na rezistoru nevyžaduje použití specifického senzoru a pro měření proudu stačí pouze jeden rezistor. Tato metoda využívá Ohmova zákona a platí, že napětí na rezistoru je přímo úměrné elektrickému proudu protékajícímu daným rezistorem.

Při sériovém umístění rezistoru do cesty proudu však vzniká nežádoucí úbytek napětí na rezistoru. Tento ztrátový výkon je minimalizován volbou rezistoru s velice nízkým odporem (v řádech $m\Omega$). Jelikož úbytek na rezistoru s nízkým odporem bude malý, tento úbytek bude obtížnější přesně měřit. Nutné je proto udělat kompromis mezi ztrátovým výkonem a přesností měření. Nevýhodou metody je závislost odporu rezistoru na teplotě, která následně ovlivňuje přesnost měření.

Pro zpřesnění měření se používají tzv. čtyřvývodové rezistory, které mají oddělený vývod pro tok elektrického proudu a vývod pro měření napětí. Tyto rezistory bývají typicky rozměrově velké, čímž zároveň dochází k rychlejší disipaci tepla.



Obrázek 2.4: Náčrt čtyřvývodového rezistoru [9]

2.3.4 Teplotní senzor

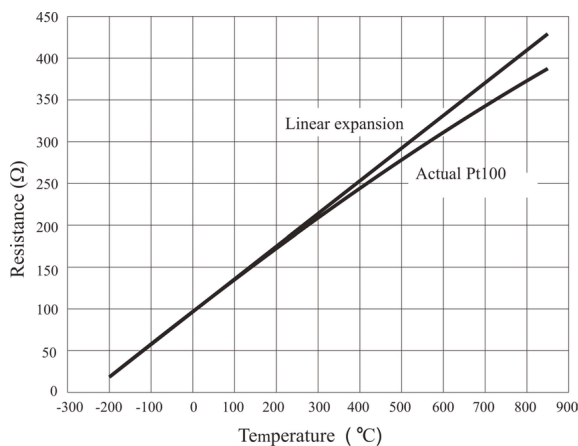
Teplotní senzor je další důležitou částí BMS. Dlouhodobé vystavení baterie vysoké teplotě může baterii poškodit, či značně zkrátit její životnost. Teplotních senzorů existuje mnoho typů, přičemž při výběru teplotního senzoru je třeba brát v úvahu jeho přesnost, cenu a rozsah měřitelných teplot.

Kovové odporové teploměry

Kovové odporové teploměry využívají závislost odporu vodivých materiálů na jejich teplotě. Rozsah měřené teploty závisí na volbě materiálu teplotního senzoru, přičemž mezi nejčastěji používané materiály patří:

- platina: -200 °C až 850 °C ,
- měď: -200 °C až 200 °C ,
- nikl: -60 °C až 180 °C ,
- wolfram: -100 °C až 1400 °C . [10]

Mezi nejtypičtějšího představitelův kovových odporových teploměrů patří PT100 (odpor $100\ \Omega$ při 0 °C), jehož závislost odporu na teplotě lze na určitém intervalu velice přesně lineárně aproximovat. [11]



Obrázek 2.5: Závislost odporu PT100 na teplotě [12]

■ Odporové polovodičové teploměry

Oproti kovovým odporovým teploměrům, polovodičové využívají závislost odporu polovodičů na jejich teplotě.

Mezi zástupce polovodičových teplotních senzorů patří NTC-termistory a PTC-termistory. U NTC-termistorů se uvádí schopnost měřit teploty od $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a narozdíl od PTC-termistoru, či zmíněného senzoru PT100, vykazují záporný teplotní součinitel odporu.

Závislost odporu polovodičových teploměrů na teplotě obvykle není lineární a je nutné tuto závislost vhodně aproximovat. U polovodičových teploměrů se pro přesnou aproximaci obvykle používá Steinhart–Hartova rovnice. [13]

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R) + C(\ln(R))^2 + D(\ln(R))^3 \quad (2.2)$$

kde:

T je teplota v Kelvinech

R je odpor teplotního senzoru při teplotě T

A, B, C, D jsou tkz. Steinhart–Hartovy koeficienty

Výpočet jednotlivých Steinhart–Hartových koeficientů je uveden v druhé části práce viz 3.3.3.

■ Termoelektrické teplotní senzory

Základem termoelektrických teploměrů jsou dva vodiče s rozdílným Seebeckovým koeficientem. Tyto vodiče jsou vyrobeny z odlišných materiálů a na jednom konci vodičů spojeny. Vlivem termoelektrického jevu následně vzniká termoelektrické napětí, které je úměrné teplotě senzoru. [14]

Pro úzké rozmezí teplot lze závislost termoelektrického napětí na teplotě aproximovat jako:

$$E = \alpha(t_m - t_o) \quad (2.3)$$

kde:

α je koeficient závislý na materiálech použitých kovů

t_m je teplota měřícího spoje

t_o je teplota referenčního spoje

Nevýhodou termoelektrických senzorů je nutnost konstantní teploty referenčního spoje, či nutná kompenzace termoelektrického napětí referenčního spoje [14].

2.3.5 Spínač obvodu

Při detekci chybového stavu je nutná reakce řídicího obvodu, která zamezí dalšímu poškození baterie. Touto reakcí bývá nejčastěji odpojení baterie od zátěže či nabíječky.

Pro odpojení baterie jsou používány tranzistory řízené elektrickým polem, mezi které patří MOSFET tranzistory. Důležitými parametry při výběru spínacího tranzistoru jsou:

- maximální drain-source napětí
- maximální proud protékající drainem
- vnitřní odpor
- prahové napětí

Vnitřní odpor tranzistoru určuje velikost ztrátového výkonu. Při výběru tranzistoru je proto důležitý výběr tranzistoru s co nejnižším vnitřním odporem. Pro následnou minimalizaci odporu lze paralelně umístit více tranzistorů, jejichž výsledný odpor bude paralelní kombinací odporů těchto tranzistorů.

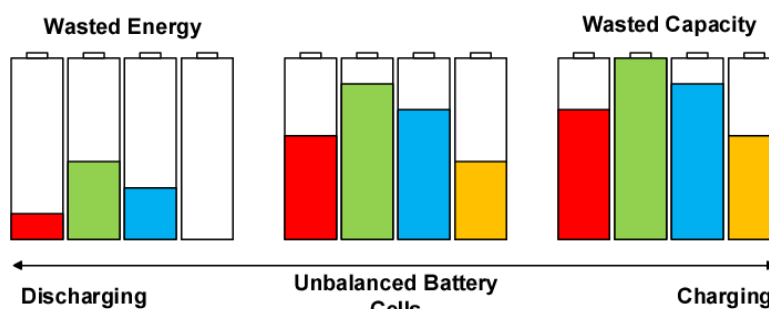
Důležité je také použití N-MOSFET (případně NPN tranzistor), které jsou sepnuté, když na svém gate (případně bázi) mají nenulové napětí. Využitím těchto tranzistorů zamezíme poškození baterie v případě poruchy řídicího obvodu.

2.4 Balancování článků baterie

Důležitou schopností ochranných obvodů je také schopnost vyvažovat napětí na jednotlivých článcích baterie. Tato část obvodu již není prvkem ochrany, avšak zajišťuje delší životnost baterie.

2.4.1 Baterie bez balanceru

Jelikož jednotlivé články baterie nebudou nikdy naprosto totožné, při jejich sériovém zapojení mohou nastat problémy. Při nabíjecích a vybíjecích cyklech se kvůli mírně odlišné chemické struktuře mohou články baterie nabíjet či vybíjet jinou rychlostí, což způsobí jejich rozbalancování.



Obrázek 2.6: Nebalancovaná baterie [15]

V levé části obrázku 2.6 lze vidět cyklus vybití, kde kvůli vybití jednoho z článků, ochranná elektronika odpojuje zátěž, i přestože ostatní články baterie ještě vybité nejsou. V pravé části je naopak nabíjecí cyklus, kde elektronika detekuje přepětí, přestože pouze jeden článek je plně nabit.

2.4.2 Baterie s balancerem

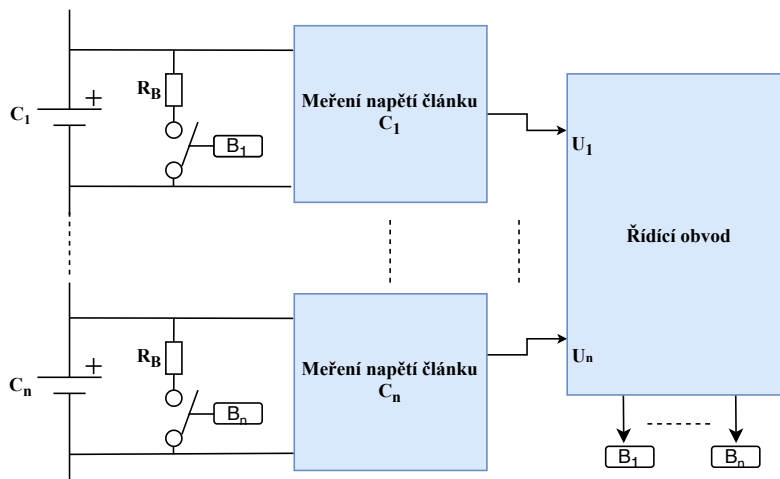
Balancerem je nazýván vyvažovací obvod, který zajišťuje, aby se jednotlivé články baterie držely ve stejné napěťové úrovni. Je-li napětí některého článku baterie vyšší než napětí ostatních článků, začne se z článku čerpat energie. Podle využití vyčerpané energie rozlišujeme pasivní a aktivní balancování.

Pasivní balancování

Pasivní balancování je jednoduchým, ne však efektivním způsobem balancování. Energie odebíraná z nejvíce nabitého článku je přeměněna na teplo, nejčastěji pomocí rezistoru.

Při návrhu obvodu to znamená umístění řízených spínačů paralelně ke každému článku baterie. Seriově mezi spínačem a článkem baterie je poté umístěn rezistor, jehož odpor určuje velikost balančního proudu. [16]

Upravené blokové schéma 2.1 s implementovaným pasivním balancováním je níže uvedené na obrázku 2.7.



Obrázek 2.7: Blokové schéma pasivního balancování

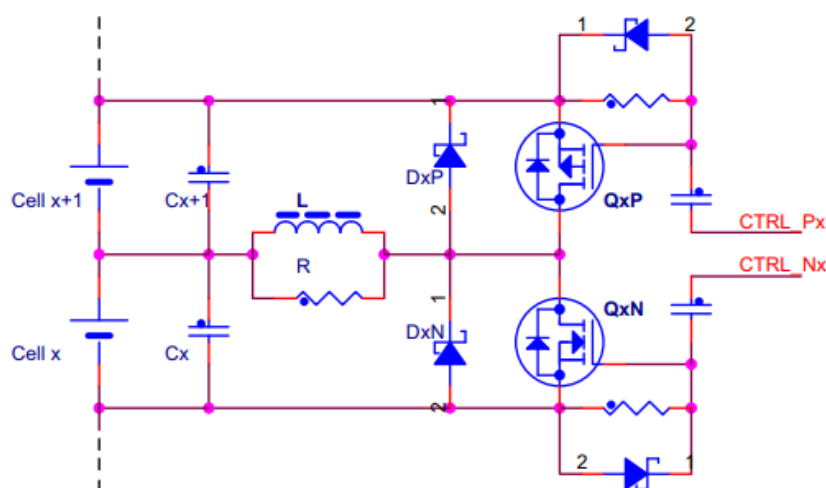
Balanční proudy při použití pasivního balancování jsou typicky malé (20-50 mA), proto tento druh balancování není schopen zajistit jednotné napětí článku, je-li rozdíl napětí článku velký [16].

Aktivní balancování

Při aktivním balancování je energie odebíraná z nejvíce nabitého článku předávána nejméně nabitému článku. Tímto je zamezeno ztrátě energie na rezistoru a energie je efektivně využita.

V případě aktivního balancování jsou využívány obvody s DC-DC konvertory, nejčastěji pak buck-boost konvertory. Náboj z článku s vysokým napětím je uchován na induktoru a následně přepojen do článku s nejnižším napětím [17]. Implementace aktivního balancování je proto výrazně složitější a cenově nákladnější.

V práci uvádím schéma obvodu 2.8, starající se o aktivní balancování článků, vytvořené firmou NXP. Firma NXP v konkrétním návrhu uvádí efektivitu až 92% se schopností vybalancovat 5% rozdíl napětí článků během 15 minut. [17]



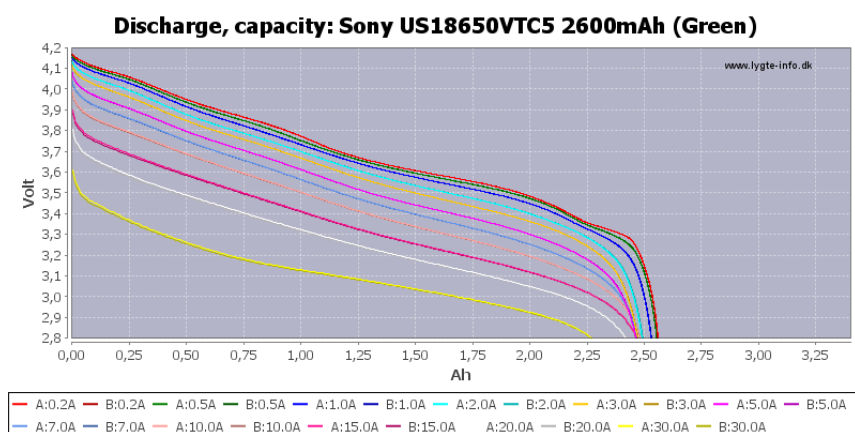
Obrázek 2.8: Návrh aktivního balanceru firmy NXP [17]

2.5 Odhad míry nabití (SOC)

Součástí zadání práce je také odhad míry nabití (State of charge). Metody pro určení míry nabití baterie jsou pouze metody aproximační a jejich přesnost se typicky snižuje s počtem nabíjecích a vybíjecích cyklů.

2.5.1 Metoda aproximace SOC pomocí napětí baterie

Metoda aproximace pomocí napětí je nejjednodušší volbou pro určení míry nabití baterie. Tato metoda vyžaduje znalost pouze jednoho údaje o baterii a to její aktuální napětí. Problémem této metody je vnitřní odpor baterie, který při nabíjení, či vybíjení ovlivňuje měřené napětí. V závislosti na elektrickém proudu procházejícím baterií a teplotě baterie jsou měřeny jiné hodnoty napětí. [18]



Obrázek 2.9: Závislost napětí baterie na vybíjecím proudu [19]

Na grafu 2.9 lze tuto závislost napětí akumulátoru Sony VTC5 na proud protékajícím tímto akumulátorem pozorovat. Pro zpřesnění této metody je důležité měřit napětí při otevřeném obvodu, tedy ve chvíli, kdy baterie není zatížená. Zároveň baterie musí být v ustáleném stavu. Do tohoto se po odpojení zátěže dostane v řádu desítek minut [20]. Tato metoda je proto nevhodná, je-li nutno znát stav nabití baterie při provozu.

2.5.2 Aproximace SOC pomocí změny náboje baterie

Používanější metodou je tzv. coulomb counting. Tato metoda matematicky integruje měřený vstupní a výstupní proud za určitý interval a následně poměr této hodnoty a nominální kapacity přičítá, resp. odečítá (podle směru proudu) od poslední známé míry nabití baterie. [21]

$$SOC(t) = SOC(t_0) + \frac{\int_{t_0}^{t_0+\tau} Id\tau}{Q} \quad (2.4)$$

kde:

$SOC(t_0)$ je stav nabití v posledním známém okamžiku

I je nabíjecí/vybíjecí proud

Q je nominální kapacita baterie

Tato metoda má několik úskalí:

- Nutnost prvotní kalibrace míry nabití
- Stářím klesající kapacita baterie
- Samovybíjení baterie

2.6 Komunikace

Pro možnost sledování aktuálního stavu baterie je nutná implementace komunikace mezi řídicí částí BMS a počítačem. O tuto komunikaci se obvykle stará mikrokontrolér, který svá změřená data zasílá nadřazenému systému. Mikrokontroléry nabízejí různá komunikační rozhraní:

- UART - rozhraní umožňující snadnou sériovou komunikaci, nejčastěji mezi počítačem a dalšími zařízeními
- USB - univerzální sériová sběrnice sloužící především pro připojení periferií k počítači
- SPI - používané pro komunikaci mezi řídicími mikrokontroléry a ostatními integrovanými obvody
- CAN bus - nejčastěji používané pro vzájemnou komunikaci senzorů a funkčních jednotek

Pro komunikaci mezi mikrokontrolérem a počítačem se nejčastěji využívá USB nebo standart RS-232, využívající rozhraní UART. [22]

2.6.1 USB

Jelikož většina mikrokontrolérů již disponuje USB rozhraním, implementace hardwarové části pro USB komunikaci vyžaduje pouze použití USB konektoru. Softwarová část této komunikace je však náročná a implementování funkčního USB komunikačního protokolu není jednoduché.

2.6.2 RS-232

Komunikační standart RS-232 nabízí snadnou softwarovou implementaci komunikačního protokolu s využitím rozhraní UART. Linka RS-232 obvykle využívá konektoru D-SUB DE-9, který v dnešní době již není běžným počítačovým konektorem a tuto linku je tedy obtížnější připojit do počítače.

2.6.3 Převodník UART-USB

Uživatelsky jednoduchou volbou je využití UART-USB převodníku, díky němuž je možné využít USB konektor, ale zachovat jednoduchý komunikační standart RS-232. Tento převodník převádí jednotlivé signálové úrovně rozhraní UART na úrovně komunikačního protokolu USB.

Kapitola 3

Návrh vlastního řešení

3.1 Požadavky zadání

Druhá část práce byla zaměřena na návrh teoreticky popsaného obvodu. Cílem této části bylo vytvořit schéma ochranné a komunikační elektroniky, která byla následně realizovaná na desce plošných spojů.

Požadavky na konkrétní návrh byly následující:

- využití pěti sériově řazených akumulátorů 18650
- ochrana proti přepětí, podpětí a nadproudu
- balancování článků baterie
- automatický reset chybových stavů
- odhad míry nabití (SOC)
- možnost přenosu dat do nadřazeného systému

3.2 Návrh ochranné části obvodu

Pro navržení ochranné části zařízení bylo postupováno dle schématu 2.1 uvedeného v teoretické části práce.

Nejprve bylo nutné vybrat řídicí obvod, na jehož základě se odvíjela volba dalších senzorů. Při výběru řídicího obvodu byl kladen velký důraz na minimalizaci spotřeby tohoto obvodu. Při výběru prvků, umístěných do přímé cesty vybíjecímu/nabíjecímu proudu, byla snaha o minimalizaci vnitřního odporu těchto prvků, čímž byl následně minimalizován ztrátový výkon.

3.2.1 Výběr řídicího obvodu BMS

Při výběru řídicího obvodu BMS bylo vybíráno z několika integrovaných obvodů a mikrokontrolérů, přičemž jednotlivé možnosti s příslušnými parametry a vlastnostmi jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Obvod	Počet článků	Integ. ochrana	Integ. balanc.	Komun.	Odběrový proud	Cena
DW01A	1	ano	ne	ne	3 μ A	13 Kč
MAX17302	1	ano	ne	ano	24 μ A	51 Kč
BQ77915	3-5	ano	ano	ne	8 μ A	54 Kč
ATSAMD21E		ne	ne	ano	5 mA	73 Kč

Tabulka 3.1: Porovnání možností při výběru řídicího obvodu

Integrované obvody DW01A a MAX17302 jsou ochranné obvody pro jednočlávkovou Li-Ion baterii. Tyto obvody však nedisponují balancováním napětí na článcích baterie a pro tuto funkci je tedy nutné navrhnout externí obvod. Zároveň pro využití ve vícečlávkové baterii je nutné kaskádně zařadit několik těchto obvodů. Mikrokontrolér ATSAMD21E nabízí možnost využití baterie s vysokým počtem sériově řazených článků (zapojení multiplexoru viz 2.3.2), avšak nedisponuje žádnými integrovanými funkcemi vhodnými pro BMS.

Pro vyžadovanou ochranu pětičlávkové Li-Ion baterie byl nalezen integrovaný obvod BQ77915 od firmy Texas Instruments, který disponuje integrovanou ochranou a balancováním článků baterie s nízkým odběrovým proudem a přijatelnou cenou. Využitím tohoto integrovaného obvodu se návrh stává jednodušším a nevyžaduje návrh externího obvodu pro ochranu a balancování článků.

Firma Texas Instruments vyrábí 5 modelů tohoto integrovaného obvodu, které se liší hraničními hodnotami monitorovaných parametrů baterie. Díky tomu je BQ77915 vhodným řídicím obvodem pro široké spektrum bateriových článků, včetně využitých akumulátoru Li-Ion 18650. Zároveň tento obvod nabízí možnost kaskádního řazení více obvodů stejného typu, umožňující využití baterie o větším počtu sériových článků než 5. [7]

Důvodem výběru tohoto integrovaného obvodu byla jeho poměrně nízká cena, zanedbatelný odběrový proud a mnoho integrovaných funkcí, čímž byl návrh zařízení výrazně zjednodušen.

3.2.2 Výběr senzorů pro ochrannou část BMS

Výběr jednotlivých senzorů byl značně ovlivněn výběrem řídicího obvodu BQ77915, v jehož manuálu byli uvedeny požadavky a omezení při volbě senzorů.

■ Výběr teplotního senzoru

Jelikož zadání práce neuvádí potřebu chránit baterii před vysokou/nízkou teplotou, teplotní senzor určený pro ochranu nebyl při návrhu umístěn.

Čip BQ77915 však možnost tohoto teplotního senzoru poskytuje s požadavkem na NTC-termistor, či teplotní senzor s podobnou závislostí odporu na teplotě.

■ Výběr proudového senzoru

Integrovaný obvod BQ77915 měří napětí mezi svými vstupy SRP a SRN a na základě tohoto napětí vyhodnocuje, zda se nejedná o nadproudový stav. Touto mezní hodnotou je 60 mV s tolerancí 20%. [7]

Jako metoda určení proudu bylo proto využito měření úbytku na shunt rezistoru. V závislosti na velikosti přípustného proudu je následně volena velikost tohoto rezistoru.

V této práci byl zvolen maximální přípustný proud 10 A a hodnota rezistoru byla vypočtena jako:

$$R_{SH} = \frac{U}{I} = \frac{60 \cdot 10^{-3}}{10} = 6 \text{ m}\Omega \quad (3.1)$$

Jelikož hodnota 0.006 Ω není typizovanou hodnotou, byl zvolen rezistor s odporem 5 m Ω . Po zahrnutí tolerance mezní hodnoty, při které je detekován nadproud, dostáváme následující hodnoty:

Hodnota vždy přípustná	Hodnota vždy detekovaná jako nadproud
9,6 A	14,4 A

Tabulka 3.2: Hraniční hodnoty proudu

■ Způsob měření napětí článků baterie

Měření napětí je integrovanou funkcí použitého obvodu, přičemž vnitřní struktura lze nalézt na blokovém schématu uvedeném v manuálu obvodu BQ77915 [7]. Pro měření napětí obvod využívá multiplexor a napěťový komparátor, jehož funkce je uvedena a vysvětlena v úvodu práce v části 2.3.2.

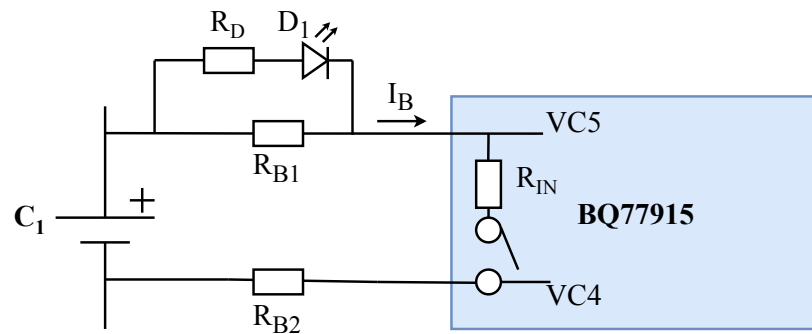
Na základě naměřeného napětí článků vyhodnocuje vybraný obvod BQ77915 stavy přepětí a podpětí s následujícími hraničními hodnotami:

Minimální napětí článků [V]	Maximální napětí článků [V]
2,9	4,2

Tabulka 3.3: Hraniční hodnoty napětí článků

■ 3.2.3 Návrh balancování

Výhodou integrovaného obvodu BQ77915 je také jeho integrovaná schopnost pasivního balancování článků baterie. Tento obvod také umožňuje balancování pomocí externích spínačů, avšak jelikož požadavkem práce byl balanční proud mezi 20-30 mA, dostačující bylo využití integrovaného balancování čipem BQ77915.



Obrázek 3.1: Blokové schéma balančního obvodu

S volbou konkrétního balančního proudu souvisela volba rezistorů R_B . Na schématu 2.6 je uvedena část balančního obvodu (pouze jeden článek baterie), přičemž paralelně k jednomu z rezistorů byla vždy umístěna LED dioda, signalizující, zda právě probíhá balancování konkrétního článku.

Byla zvolena LED dioda s napětím v propustném směru $U_{LED} = 1,8\text{ V}$ před kterou byl umístěn rezistor $R_{LED} = 1\text{ k}\Omega$ omezující proud LED diodou. Využitím Kirchhoffova prvního zákona a zvolením maximálního balančního proudu $I_B = 25\text{ mA}$ byly následně vypočteny hodnoty rezistorů R_{B1} a R_{B2} , přičemž platí $R_{B1} = R_{B2}$ a $R_{IN} = 14\ \Omega$. Platí:

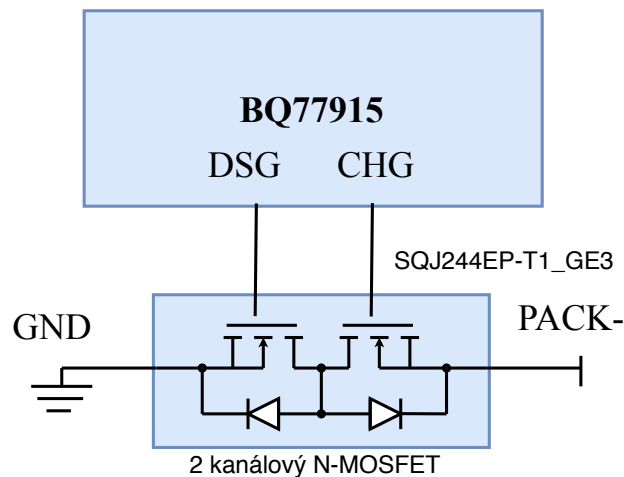
$$\frac{4,2 - I_B(R_{B2} + R_{IN})}{R_{B1}} + \frac{4,2 - I_B(R_{B2} + R_{IN}) - U_{LED}}{R_D} = I_B \quad (3.2)$$

Dosažením hodnot a vyřešením rovnice byla získána hodnota $R_{B1} = R_{B2} = 77,185\ \Omega$, proto byly zvoleny balanční rezistory s odporem $75\ \Omega$.

Je-li balancování zapotřebí, začíná při nabíjecím cyklu při překročení hranice napětí článku $3,8\text{ V}$. Následné rozdíly napětí článků a hranice nutné pro ukončení balancování nejsou v práci uváděny, avšak kompletní popis a vysvětlení balančního cyklu se vyskytuje v manuálu integrovaného obvodu BQ77915 [7].

■ 3.2.4 Výběr spínače obvodu

Jako spínač ochranného obvodu byl zvolen SQJ244EP-T1GE3 vyráběný firmou Vishay.



Obrázek 3.2: Blokové schéma spínače obvodu

Jedná se o dvoukanálový N-MOSFET, jehož vnitřní zapojení je uvedeno na schématu 3.2. Tyto dva sériově řazené N-MOSFET tranzistory disponující maximálním drain proudem 20 A a maximálním drain-source napětím 40 V, vyhovují této aplikaci [23]. Vnitřní odpor této dvojice tranzistorů je pouze přibližně 15 mΩ, proto byla zvolena pouze jedna tato dvojice a nebylo řazeno více paralelních tranzistorů.

Na základě chybových stavů jsou tyto MOSFET tranzistory řízeny výstupy DSG a CHG obvodu BQ77915.

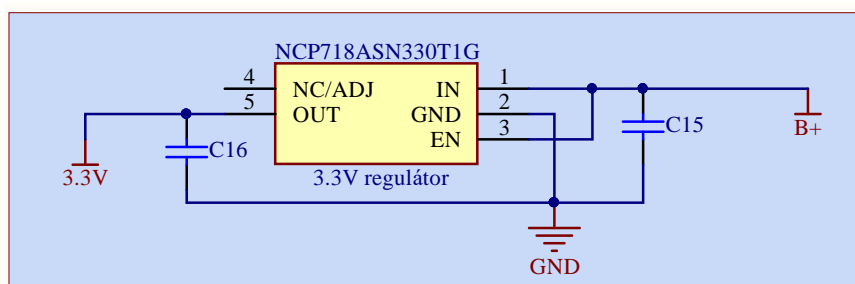
3.3 Návrh komunikační části obvodu

Vybraný integrovaný obvod BQ44915, využitý jako řídicí prvek ochranné části BMS, nedisponuje možností komunikace a přenosu dat do nadřazeného systému. Z tohoto důvodu bylo třeba zvolit mikrokontrolér, jenž tuto komunikaci podporuje.

3.3.1 Výběr napěťového regulátoru pro mikrokontrolér

Většina dostupných mikrokontrolérů vyžaduje napájecí napětí 3,3 V. Z tohoto důvodu byl zvolen regulátor, regulující vstupní napětí na zmíněnou úroveň napětí. Jako vstupní napětí regulátoru bylo využito napětí celé baterie (nikoli pouze jednoho článku), což zvýšilo ztrátový výkon, avšak zamezilo rozbalancování článků.

Při návrhu byl zvolen lineární regulátor NCP718, umožňující vstupní napětí až 24 V s klidovým odběrem proudu pouze okolo 4 μA [24].



Obrázek 3.3: Schéma zapojení regulátoru

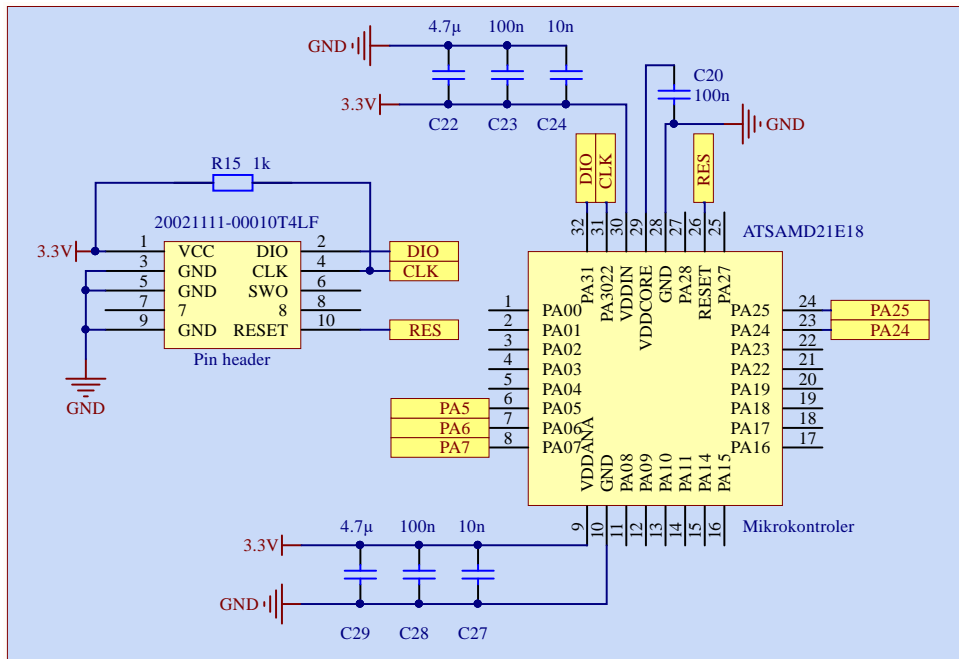
I přestože byl zvolen regulátor lineární, kvůli vysokému rozdílu hodnot vstupního a výstupního napětí regulátoru by bylo výhodnější využití impluzního step-down konvertoru. Volbou tohoto druhu regulátoru by bylo dosaženo větší efektivity a nižšího ztrátového výkonu. Důvodem nevyužití step-down konvertoru byla vyšší cena a především nedostupnost vhodného modelu při výběru komponentů.

3.3.2 Výběr komunikačního mikrokontroléru

Jako řídicí prvek komunikační části obvodu byl vybrán mikrokontrolér AT-SAMD21E18 od firmy Microchip. Hlavním důvodem výběru tohoto mikrokontroléru byla dostupnost podpory ze strany školy a zároveň vypůjčení programátoru/debuggeru Atmel ICE, přímo podporující zvolený mikrokontrolér.

Zmíněný mikrokontrolér zároveň disponuje následujícími hardwarovými bloky a parametry [25].

- nízkospotřebový procesor Arm Cortex M0+
- dostupnost režimu spánku
- 12-bitový AD převodník
- dostatečný počet vstupů a výstupů
- sériová komunikace - UART



Obrázek 3.4: Schéma zapojení mikrokontroléru

Při zapojení mikrokontroléru byly před každý napájecí vstup zařazeny tři blokové kondenzátory, lišící se svou kapacitou. Na schématu 3.4 se jedná o kondenzátory C27-C29 a C22-C24. Cílem těchto kondenzátorů je vyfiltrovat rušení na širokém spektru frekvencí a udržet tak napájecí napětí mikrokontroléru stabilní. Součástka pojmenovaná jako "pin header" je 10 kolíková lišta sloužící k připojení programátoru a následnému programování procesoru.

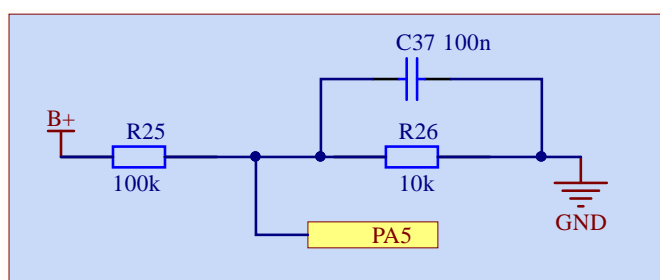
3.3.3 Monitorování analogových veličin

Jelikož integrovaný obvod BQ77915 svá naměřená data není schopen mikrokontroléru předat, mikrokontrolér musí mít své senzory pro monitoring stavu baterie. Mikrokontrolér disponuje 12-bitovými AD převodníky, přičemž jako reference AD převodníku byla zvolena hodnota $\frac{1}{1,48} \cdot V_{DDANA}$, tedy přibližně 2,2297 V. Rozlišení AD převodníku pak určíme jako:

$$U_{ADCres} = \frac{\frac{1}{1,48} \cdot V_{DDANA}}{2^{12}} = \frac{\frac{1}{1,48} \cdot 3,3}{4096} \doteq 0,544 \text{ mV} \quad (3.3)$$

Měření napětí baterie

Pro měření napětí celé baterie byl využit napěťový dělič, který napětí baterie dělí na napěťovou úroveň přijatelnou pro AD převodník.



Obrázek 3.5: Schéma zapojení měření napětí

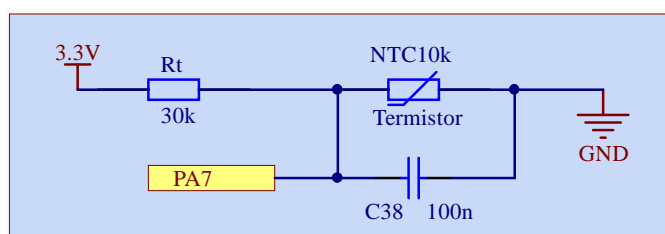
Zvolen byl dělicí poměr 10:1 (viz 3.5), z čehož vyplývá vzorec:

$$U_B [\text{V}] = U_{PA5} \cdot \frac{R25 + R26}{R26} = 11 \cdot U_{PA5} \quad (3.4)$$

Zároveň byl k rezistoru R26 paralelně umístěn kondenzátor pro potlačení vysokofrekvenčního rušení a udržení stabilního napětí při vzorkování AD převodníkem.

■ Měření teploty baterie

Pro měření teploty byl z cenových důvodů zvolen termistor NTC10k a obdobný postup jako při měření napětí baterie, avšak neznámou hodnotou je nyní odpor termistoru, nikoli vstupní napětí děliče jako v případě měření napětí.



Obrázek 3.6: Schéma zapojení měření teploty

Pro odpor termistoru následně platí:

$$R_{NTC} = \frac{U_{PA7} \cdot R_t}{V_{DD_{ANA}} - U_{PA7}} = \frac{30000 \cdot U_{PA7}}{3,3 - U_{PA7}} \quad (3.5)$$

Díky znalosti odporu termistoru lze nyní pomocí vhodné aproximace závislosti odporu na teplotě termistoru NTC10k určit měřenou teplotu. Dle Steinhart-Hartovi rovnice uvedené v úvodu (viz 2.2) lze tuto závislost velmi přesně aproximovat.

Pro výpočet Steinhart-Hartových koeficientů A,B,C,D je třeba znát alespoň 4 odpory termistoru, odpovídající různým teplotám. Tyto hodnoty byly nalezeny v manuálu tohoto komponentu a následně experimentálně ověřeny.

Teplota [°C]	Odpor [kΩ]
0	27,28
25	10,0
50	4,160
80	1,668

Tabulka 3.4: Závislost odporu termistoru na teplotě [26]

Následně platí že:

$$\begin{bmatrix} 1 & \ln(R_1) & (\ln(R_1))^2 & (\ln(R_1))^3 \\ 1 & \ln(R_2) & (\ln(R_2))^2 & (\ln(R_2))^3 \\ 1 & \ln(R_3) & (\ln(R_3))^2 & (\ln(R_3))^3 \\ 1 & \ln(R_4) & (\ln(R_4))^2 & (\ln(R_4))^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} \\ \frac{1}{T_2} \\ \frac{1}{T_3} \\ \frac{1}{T_4} \end{bmatrix}$$

Díky regularitě matice lze koeficienty vyjádřit jako:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \ln(R_1) & (\ln(R_1))^2 & (\ln(R_1))^3 \\ 1 & \ln(R_2) & (\ln(R_2))^2 & (\ln(R_2))^3 \\ 1 & \ln(R_3) & (\ln(R_3))^2 & (\ln(R_3))^3 \\ 1 & \ln(R_4) & (\ln(R_4))^2 & (\ln(R_4))^3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} \\ \frac{1}{T_2} \\ \frac{1}{T_3} \\ \frac{1}{T_4} \end{bmatrix}$$

Výpočtem této maticové rovnice získáváme hodnoty jednotlivých Steinhart-Hartových koeficientů.

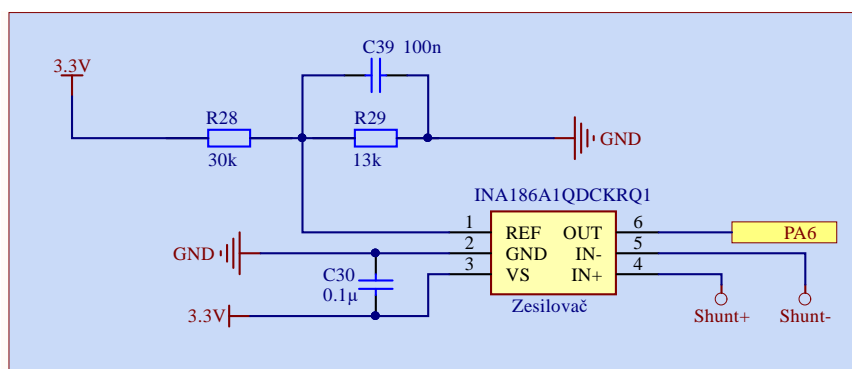
$$\begin{aligned} A &= 8,255073620681563 \cdot 10^{-4} \\ B &= 2,718519120971652 \cdot 10^{-4} \\ C &= -2,215336507863097 \cdot 10^{-6} \\ D &= 2,720897676308830 \cdot 10^{-7} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Platí tedy, že:

$$T_{NTC} [^{\circ}\text{C}] = \frac{1}{A + B \ln(R_{NTC}) + C(\ln(R_{NTC}))^2 + D(\ln(R_{NTC}))^3} - 273,15 \quad (3.7)$$

■ Měření nabíjecího/vybíjecího proudu

Pro měření nabíjecího/vybíjecího proudu byl využit totožný shunt rezistor používaný integrovaným obvodem BQ77915 viz 3.1. Pro zpřesnění měření a zároveň možnost měření obou směrů proudu byl za shunt rezistor zařazen zesilovač INA186A1QDCKRQ1 [27] od firmy Texas Instruments.



Obrázek 3.7: Schéma zapojení měření proudu

Jako napěťová reference zesilovače byla zvolena hodnota $U_{OFF} = 3,3 \cdot \frac{13}{30}$ V, tedy přibližně $U_{OFF} = 1$ V. Napětí odpovídající nabíjecímu proudu je následně od reference odečítáno, a naopak napětí odpovídající vybíjecímu proudu je k referenci přičítáno. Zvolením varianty se zesílením 25V/V a zachováním totožné reference AD převodníku (viz 3.3) získáváme následující hodnoty:

Max. měřitelný nabíjecí proud	Max. měřitelný vybíjecí proud
8,0 A	9,837 A

Tabulka 3.5: Maximální měřitelný nabíjecí/vybíjecí proud

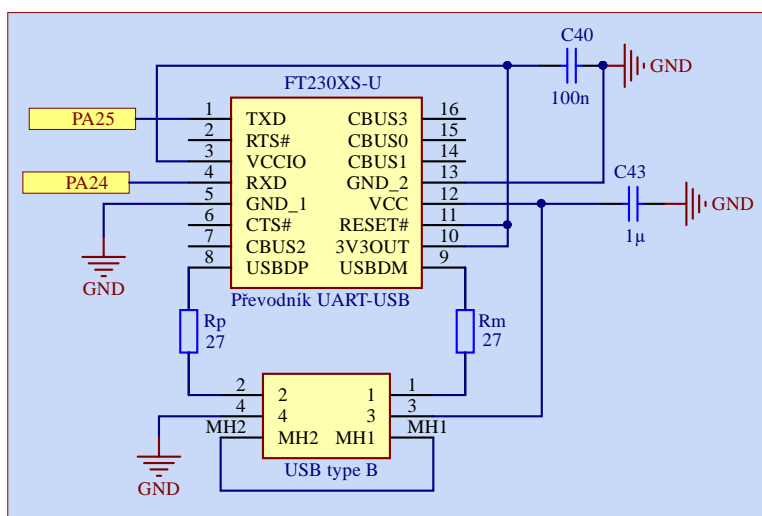
Pro zvětšení hodnot uvedených v tabulce 3.5 je třeba zvolit zesilovač s menším zesílením, popřípadě zesilovač s nastavitelným zesílením.

Pro výpočet proudu platí:

$$I [\text{A}] = \frac{U_{PA6} - U_{OFF}}{GAIN \cdot R_{SH}} = \frac{U_{PA6} - 3,3 \cdot \frac{13}{30}}{25 \cdot 0,005} \doteq \frac{U_{PA6} - 1}{0,125} \quad (3.8)$$

3.3.4 Řešení fyzické vrstvy komunikace

Pro komunikaci zařízení s počítačem byl využit převodník UART-USB FT230XS-U [28] firmy FTDI. Tento převodník převádí úrovně signálů UART komunikace na napěťové úrovně USB komunikace, přičemž v počítači je následně zařízení zobrazeno jako virtuální COM port.



Obrázek 3.8: Schéma zapojení převodníku UART-USB

Na schématu 3.8 lze pozorovat, že je převodník napájen z USB konektoru, tedy není-li vyžadován přenos dat mezi mikrokontrolérem a počítačem tzn. není-li připojen USB kabel, tento čip je nenapájen.

Kapitola 4

Realizace návrhu a ověření funkčnosti

4.1 Realizace obvodového návrhu

Na základě výše navržených dílčích schémat byl vytvořen finální obvodový návrh. Jako řídicí prvek ochranné části BMS byl využit obvod BQ77915 a zapojení ochranné části se řídilo dokumentací tohoto integrovaného obvodu (viz 3.2.1). Pro pasivní balancování byly vypočteny vhodné hodnoty balančních rezistorů (4.4) a pro odepnutí zátěže od baterie využit dvoukanálový MOSFET tranzistor (3.2). Následně pro komunikační část zařízení byl zapojen mikrokontrolér (3.4), který je napájen lineárním regulátorem (3.3). Pro monitorování jednotlivých analogových veličin byla využita zapojení 3.5, 3.6 a 3.7. Pro přenos naměřených dat do nadřazeného systému byl použit převodník UART-USB a USB konektor typu B (3.8).

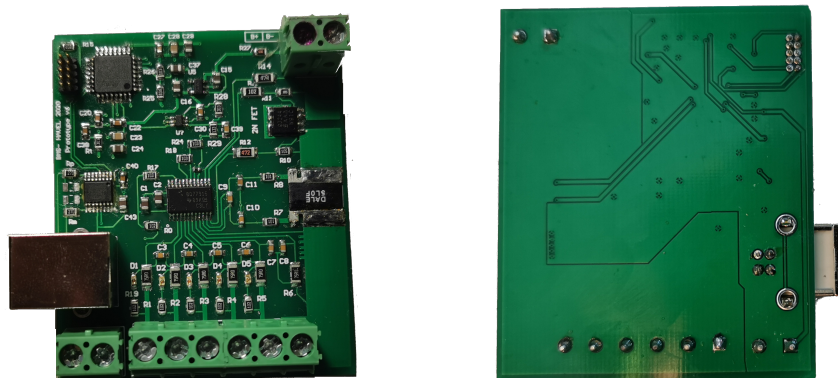
Kompletní návrh obvodové části včetně kompletního popisu hodnot rezistorů, kondenzátorů a dalších součástek je uveden v příloze práce (6.3).

4.2 Realizace desky plošných spojů

Z vytvořeného obvodového návrhu byl následně vytvořen návrh desky plošných spojů. Tento návrh je detailně uveden v příloze práce (6.1 a 6.2). Při návrhu této desky byla snaha o minimalizaci rozměrů desky, avšak bylo nutné volit komponenty a mezery mezi nimi tak, aby desku bylo možné jednoduše osadit pomocí ruční páječky.

Dále byl také kladen důraz na šířku vodivých cest. Kvůli možnému velikému vybíjecímu proudu musely tyto cesty být zhotoveny dostatečně široké. Z tohoto důvodu byla téměř celá spodní strana desky vyplněna cestami nejvyššího a nejnižšího potenciálu baterie.

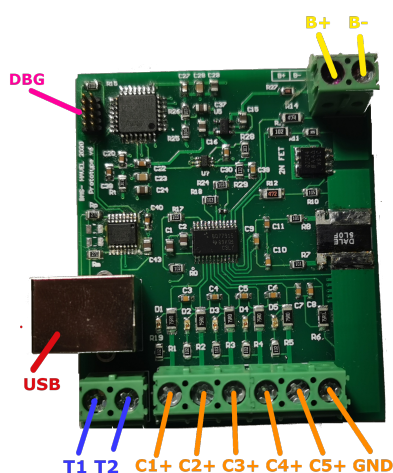
Návrh této desky byl následně zaslán do výroby, přičemž byla zvolena deska o šířce 1,6 mm s vrstvou mědi 35 μm (1 oz). Tato šířka vrstvy mědi byla zvolena především z cenových důvodů, avšak pro lepší tepelnou stabilitu je vhodné využít šířku alespoň 70 μm (2 oz). Vyrobená deska byla následně zkontrolována a osazena příslušnými komponenty. Kompletně osazená deska plošných spojů je uvedena na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Deska plošných spojů

Pro uchycení jednotlivých periferií a baterie byly využity šroubovací svorkovnice vodič-deska. Konkrétní místa uchycení jsou popsány na následujícím obrázku 4.2, kde

- C1+... C5+ jsou kladné póly jednotlivých článků baterie,
- GND je záporný pól posledního článku baterie,
- T1 a T2 jsou místa pro uchycení odporového teplotního čidla,
- B+ a B- jsou výstupy chráněné baterie,
- DBG je kolíková lišta pro připojení programátoru/debuggeru,
- USB je USB typu B pro propojení zařízení s počítačem.



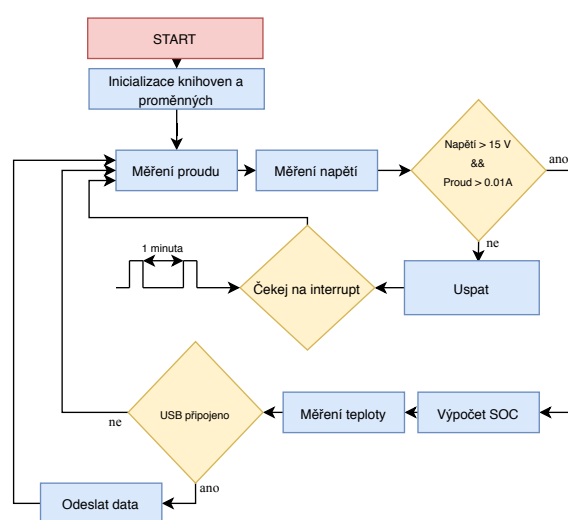
Obrázek 4.2: Svorkovnice desky plošných spojů

K desce plošných spojů uvedené na obrázku 4.1 byly následně dle popisu na obrázku 4.2 připojeny jednotlivé periferie, sestavena a připojena baterie. Po otestování funkčnosti ochranné části obvodu byla tato deska naprogramována a následně na ní prováděny níže uvedené měření a testy.

4.3 Realizace softwarové části zařízení

Jelikož je snaha o minimalizaci odběrového proudu mikrokontroléru, při programování tohoto zařízení byl kladen důraz na maximalizaci využití režimu spánku mikrokontroléru. Pokud by však mikrokontrolér byl v režimu spánku v nežádoucí okamžiky, při odhadu SOC by docházelo k výrazným nepřesnostem.

Nutné bylo tedy zvolit kompromis mezi přesností odhadu SOC a minimalizací spotřeby mikrokontroléru.



Obrázek 4.3: Diagram průběhu programu

Implementovaný program se řídí uvedeným diagramem 4.3. Mikrokontrolér je držen v režimu spánku, přičemž každou minutu je probuzen nízkopříkonovými hodinami. Po tomto probuzení je změřeno napětí na shunt rezistoru a napětí celé baterie. Jakmile je měřené napětí baterie pod 15 V či měřený proud je velice nízký (ideálně nulový, avšak je nutné počítat s nepřesností měření způsobenou rozlišením AD převodníku), mikrokontrolér se okamžitě vrací do režimu spánku. V opačném případě mikrokontrolér začíná odhadovat míru nabití a změřená data zasílat nadřazenému systému.

4.3.1 Implementace odhadu míry nabití

Jelikož je požadována znalost SOC během provozu baterie, jako metoda odhadu byla zvolena metoda coulomb counting. Tato metoda na základě proudu, protékajícího shunt rezistorem, nominální kapacity baterie a po-

sledního známého údaje o míře nabití odhaduje aktuální míru nabití (viz 2.5.2).

Proud měřený na shunt rezistoru zahrnuje pouze nabíjecí/vybíjecí proud. Z tohoto důvodu nemohl být při odhadu SOC započten přesný odběrový proud mikrokontroléru. Jelikož tento odběrový proud je pod rozlišovací schopnost využitého AD převodníku, není odhad SOC odběrovým proudem mikrokontroléru výrazně ovlivněn. Výraznější chybu v odhadu SOC způsobují balanční obvody, jejichž sepnutí není známým údajem pro mikrokontrolér. Pro zpřesnění by proto bylo nutné mikrokontrolérem detekovat sepnutí balančních obvodů a na základě těchto informací kompenzovat odhad SOC.

4.3.2 Komunikační protokol

Pro komunikaci mezi mikrokontrolérem a počítačem byly implementovány 4 různé zprávy:

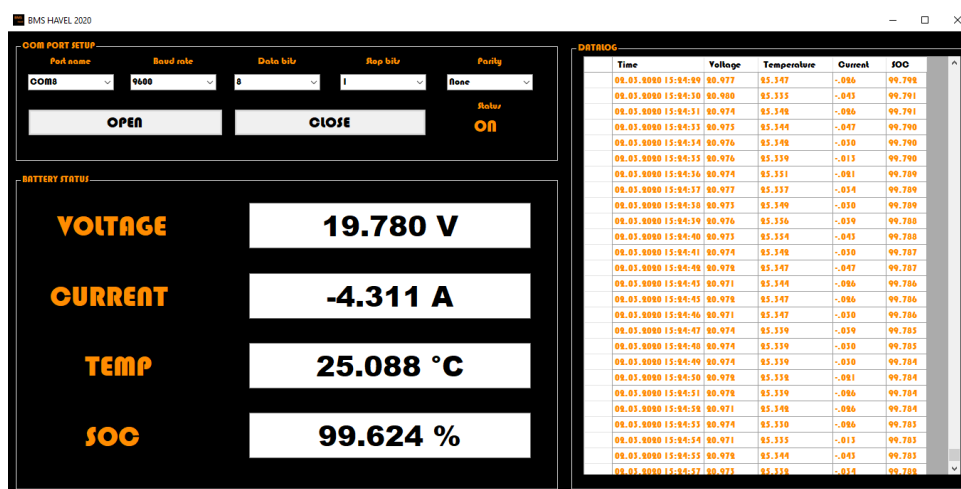
Veličina	Teplota	Napětí	Proud	SOC
Zpráva	"tDATA\n"	"vDATA\n"	"cDATA\n"	"sDATA\n"

Tabulka 4.1: Komunikační protokol

Uvedená proměnná DATA v tabulce 4.1 označuje konkrétní hodnotu dané veličiny. O jakou veličinu se jedná pak uvádí vždy první písmeno na řádku. Odesílaný paket pak může vypadat jako : "t24.12\nv20.13\nc1.52\ns82.14\n"

4.3.3 Počítačová aplikace

Pro snadné sledování stavu baterie byla vytvořena počítačová aplikace, umožňující sledování všech měřených veličin baterie. Aplikace se skládá z několika částí, které umožňují nastavení komunikace a následné sledování aktuálních, či starších měřených veličin.



Obrázek 4.4: Implementovaná počítačová aplikace

V aplikaci je nejprve nutné vybrat příslušný COM port a následně nastavit parametry komunikace. Při implementaci programu pro mikrokontrolér byl použit baud rate 115200, 8 datových bitů, jeden stop bit a žádný paritní bit.

Následně je možné sledovat aktuální napětí, nabíjecí a vybíjecí proud, teplotu a míru nabití. Pro odlišení nabíjecího a vybíjecího proudu bylo před vybíjecí proud umístěno znaménko mínus.

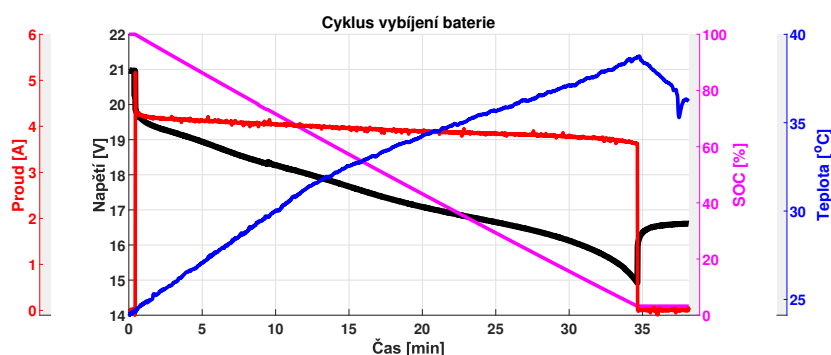
Poslední část aplikace zaznamenává starší naměřené hodnoty, přičemž význam hodnot začíná otevřením příslušného COM portu a končí jeho zavřením.

4.4 Ověření funkcí realizovaného zařízení

Poslední část práce je zaměřená na otestování funkcí implementovaného zařízení. Pro otestování bylo provedeno několik testů a na základě monitorovaných parametrů sledována funkčnost zařízení.

4.4.1 Testování detekce podpětí

Prvním provedeným testem byl cyklus vybíjení baterie, provedený za účelem pozorování zásahu ochranné elektroniky při nízkém napětí baterie. Baterie byla před testem plně nabitá a její SOC zkalibrován na 100%. Jako testovací zátěž byly využity dvě sériově řazené autožárovky, přičemž každá žárovka měla uváděné napětí 12 V a výkon 50 W. Teplota okolí byla změřena pokojovým teploměrem jako 24,8 °C.

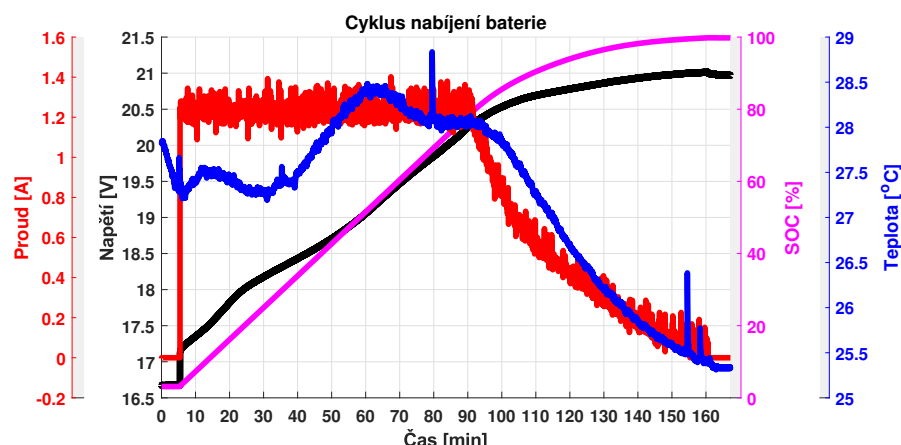


Obrázek 4.5: Cyklus vybíjení baterie

Na grafu 4.5 lze pozorovat celý vybíjecí cyklus baterie. Test proběhl podle očekávání a lze na něm pozorovat několik důležitých momentů. Při připojení této zátěže lze pozorovat rychlý náběh odběrového proudu (prvotní rozsvícení žárovek), který následně klesá na očekávanou hodnotu. V tomto momentu je také vidět vliv vnitřního odporu článků baterie, který způsobil rychlý pokles měřeného napětí. Okolo 35. minuty lze následně vidět zásah ochranné elektroniky, která při napětí 14,82 V odpojila zátěž, načež se napětí na baterii začalo ustalovat a odběrový proud klesnul na nulu. Měřený SOC v tento moment byl 3,21 %.

4.4.2 Testování detekce přepětí

Druhý test, jež následoval 10 minut po provedení prvního testu, měl za cíl otestování přepětové ochrany. Jako nabíjecí zařízení byl použit laboratorní zdroj, nastavený v režimu konstantního proudu/konstantního napětí a nabíjecí proud byl nastaven na 1,2 A. Jelikož test následoval téměř okamžitě po prvním testu, teplota baterie ještě nebyla ustálená a ačkoli teplota okolí byla stále 24,8 °C, teplota baterie při začátku testu byla 27,83 °C.

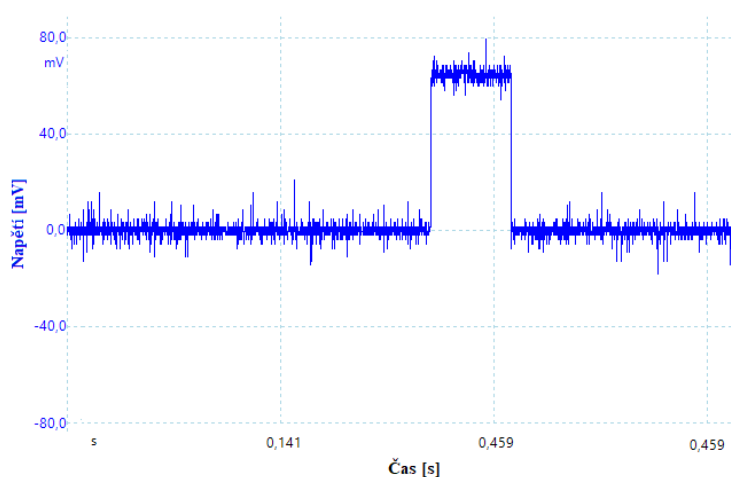


Obrázek 4.6: Cyklus nabíjení baterie

Na grafu 4.6 lze pozorovat způsob nabíjení konstantní proud/konstantní napětí, kde v 91. minutě nastává zlom a nabíjení přechází z režimu konstantního proudu na konstantní napětí. Kmitání nabíjecího proudu je nejspíše způsobeno laboratorním zdrojem, jenž lze nastavit pouze s přesností 0,1 A. Zásah ochranné elektroniky lze vidět v 161. minutě, kdy napětí baterie překročilo 21 V, načež elektronika reagovala odpojením nabíječky od baterie a nabíjecí proud tedy klesnul na 0 A.

4.4.3 Testování detekce nadproudu

Pro otestování nadproudové ochrany byla zvolena odporová zátěž o odporu 1,5 Ω, tedy vybíjecí proud přibližně $21 / 1,5 = 14$ A. Tato zátěž způsobí na měřícím shunt rezistoru větší úbytek napětí než je maximální úbytek, nedetekovaný jako nadproud, 60 mV.

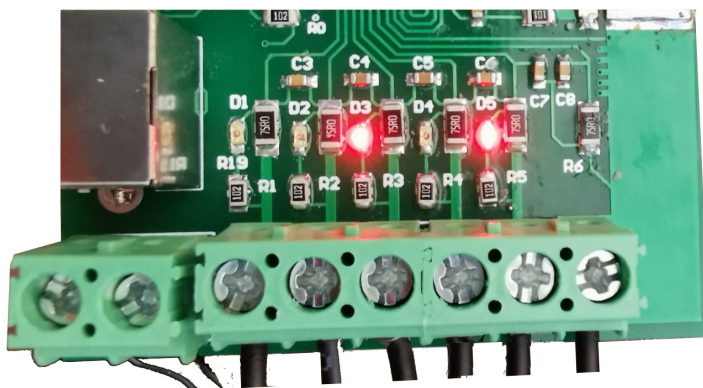


Obrázek 4.7: Napětí na shunt rezistoru

Zmíněný úbytek napětí byl sledován na shunt rezistoru pomocí osciloskopu a vyobrazen na grafu 4.7. Na grafu je po dobu přibližně 150 ms vidět úbytek napětí 71,3 mV, tedy hodnota větší než povolených 60 mV. Ochranný obvod proto téměř okamžitě detekoval chybový stav a odpojil zátěž od baterie.

4.4.4 Testování schopnosti balancování

Pro otestování balancování byly články baterie vybity a následně dva z těchto článků nahrazeny články téměř plně nabitými. Po připojení nabíječky okamžitě začalo balancování těchto dvou článků baterie. Dva sepnuté balanční obvody jsou zobrazeny na obrázku 4.8 signalizované svítící LED diodou.



Obrázek 4.8: Ukázka dvou sepnutých balančních obvodů

Takto byly postupně nahrazovány jednotlivé články baterie a testována funkčnost jednotlivých balančních obvodů. Všechny balanční obvody vykazovaly stejné vlastnosti a jejich chování bylo dle předpokladů.

4.4.5 Testování konzistentnosti odhadu míry nabití

Pro otestování konzistentnosti odhadu SOC byla provedena řada nabíjecích a vybíjecích cyklů za stejných podmínek jako v části 4.4.1 a 4.4.2 a sledována počáteční a koncová hodnota SOC jednotlivých cyklů. Výsledky byly následující:

Cyklus	Počáteční hodnota SOC [%]	Koncová hodnota SOC [%]
Vybíjecí č.1	100	7,54
Nabíjecí č.1	7,54	100,12
Vybíjecí č.2	100,12	7,47
Nabíjecí č.2	7,47	100,06
Vybíjecí č.3	100,06	7,51
Nabíjecí č.3	7,51	99,99
Vybíjecí č.4	99,99	7,43
Nabíjecí č.4	7,43	100,13

Tabulka 4.2: Konzistentnost odhadu SOC

Z tabulky 4.2 lze konstatovat, že odhad SOC je konzistentní a koncové hodnoty odpovídajících cyklů se liší průměrně o 0,1 %.

4.4.6 Testování automatického resetu chybových stavů

Nastane-li chybový stav, je nutné po pomnutí tohoto chybového stavu opět povolit provoz baterie. Nutné podněty pro tento reset jsou uvedeny v manuálu integrovaného obvodu BQ77915 a jejich funkčnost byla experimentálně otestována na několika vybíjecích a nabíjecích cyklech.

Chybový stav	Podmínka resetu chybového stavu
Přepětí	Hystereze ± 200 mV/ připojení zátěže
Podpětí	Hystereze ± 400 mV/ připojení nabíječky
Nadproud	Odpojení zátěže

Tabulka 4.3: Podmínky resetu chybového stavu

Závěry z provedených experimentů jsou uvedeny v tabulce 4.3 a odpovídají podmínkám uvedených v manuálu integrovaného obvodu.

4.4.7 Měření přesnosti monitorovaných veličin

Posledním testem bylo porovnání hodnot měřených mikrokontrolérem s hodnotami měřenými digitálním multimetrem. Okamžiky měření byly časově nezávislé a měřené jak při nabíjecích a vybíjecích cyklech baterie, tak v klidovém stavu baterie.

Stav	Veličina	Měření multimetrem	Měření mikrokontrolérem
V klidu	Proud	0,000 A	0,0034 A
V klidu	Napětí	16,821 V	16,816 V
V klidu	Teplota	24,980 °C	25,047 °C
Při zátěži	Proud	3,644 A	3,649 A
Při zátěži	Napětí	17,592 V	17,594 V
Při zátěži	Teplota	32,132 °C	32,149 °C

Tabulka 4.4: Ukázka porovnaných měření

Takto bylo porovnáno několik stovek hodnot a průměrná odchylka hodnoty měřené mikrokontrolérem od hodnoty měřené multimetrem vypočtena jako:

Veličina	Odchylka
Nabíjecí/vybíjecí proud	3,1 mA
Napětí baterie	1,1 mV
Teplota baterie	0,071 °C

Tabulka 4.5: Průměrná odchylka měření

Kapitola 5

Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout systém pro ochranu a monitorování pěti-článkové Li-Ion baterie. Práce byla rozdělena na tři dílčí části.

V první části byly shrnuty možnosti při návrhu ochranného zařízení baterie, následně uvedeny a stručně popsány různé typy senzorů a periférií, používané při návrhu ochranných zařízení baterie.

V druhé části byly na základě popsaných možností zvoleny vhodné prvky a komponenty a vytvořeno schéma ochranné a komunikační části obvodu. Řídící obvody tohoto zařízení byly účelně vybírány tak, aby jejich spotřeba energie byla co nejmenší, popřípadě aby byla možnost využití režimů spánků či hibernačního režimu. Obdobně byly také vybírány jednotlivé prvky obvodu, umístěné do přímé cesty vybíjecího proudu s cílem minimalizovat ztrátový výkon na těchto prvcích.

V závěru práce byl z navrženého schématu obvodu vytvořen návrh desky plošných spojů, na jehož základě byla deska vyrobena a osazena. Po zprovoznění zařízení byly provedeny testy, které měly za cíl otestovat funkce realizovaného obvodu.

Tyto testy proběhly úspěšně, a lze proto říci, že v práci byl úspěšně navržen a realizován funkční obvod, jež disponuje základními ochrannými prvky baterie včetně pasivního balancování, měřením napětí baterie, nabíjecího/vybíjecího proudu a teploty baterie. Z těchto změřených dat je následně zařízení schopné odhadnout míru nabití baterie (SOC) a tato monitorovaná data následně pomocí sériové komunikace zaslat do počítače, kde jsou zpracována navrženou aplikací.

Při implementaci zařízení jsem získal mnoho zkušeností v oblasti návrhu, výroby a osazení desky plošných spojů. Zařízení, prezentované v práci je šestou iterací návrhu, přičemž pro každou iteraci byla vytvořena samostatná deska plošných spojů. Díky velkému počtu iterací byla nutnost pečlivě se seznámit s požadavky výrobců desek plošných spojů, u nichž byla navržená deska vyráběna. Významnou částí práce byl také výběr jednotlivých komponentů, díky čemuž bylo nutné se dobře orientovat v technických popisech a parametrech jednotlivých součástí. Jednotlivé komponenty byly následně ručně osazeny na vyrobenou desku plošných spojů, čímž jsem získal cenné zkušenosti v oblasti pájení.

Navrhnutá schémata, návrh desky plošných spojů, implementovaný software mikrokontroleru, počítačová aplikace a všechny další důležité součásti práce jsou přiloženy v příloze práce (6).



Literatura

- [1] BATTERY UNIVERSITY. *What's the Best Battery?* [online]. 2017 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/archive/whats_the_best_battery
- [2] QUINN, Jason, Thomas WALDMANN, Karsten RICHTER, Michael KASPER a Margret WOHLFAHRT-MEHRENS. *Energy Density of Cylindrical Li-Ion Cells: A Comparison of Commercial 18650 to the 21700 Cells* [online]. 2018 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/328396021>
- [3] BATTERY UNIVERSITY. *BU-304a: Safety Concerns with Li-ion* [online]. 2019 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/safety_concerns_with_li_ion
- [4] SONY ENERGY DEVICES CORPORATION. *Lithium Ion Rechargeable Battery Technical Information* [online]. 2013 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.powerstream.com/p/us18650vtc5-vtc5.pdf>
- [5] BATTERY UNIVERSITY. *BU-908: Battery Management System (BMS)* [online]. 2019 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_monitor_a_battery
- [6] ASWINTH, Raj. *Multicell Voltage Monitoring for Lithium Battery Pack in Electric Vehicles* [online]. 2019 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/multi-cell-voltage-monitoring-for-lithium-battery-pack-in-electric-vehicles>
- [7] TEXAS INSTRUMENTS. *BQ77915 3-Series to 5-Series Stackable Ultra-Low Power Primary Protector with Autonomous Cell Balancing and HIBERNATE Mode* [online]. Texas, 2020 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq77915.pdf>
- [8] ŠTINDL, Daniel. *Měření proudu Halloými senzory* [online]. 2016 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=93466

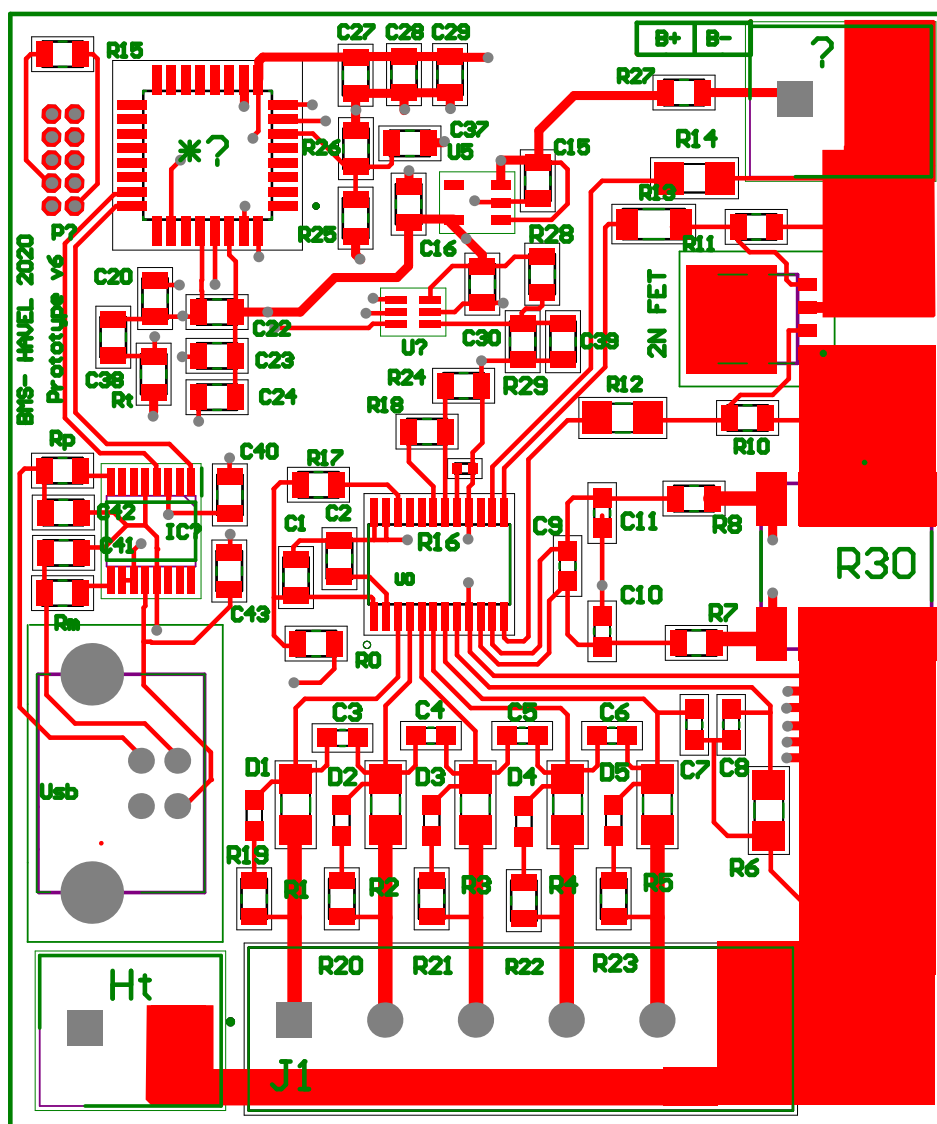
- [9] VISHAY. *Power Metal Strip® Resistors, Low Value (down to 0.001 Ω), Surface Mount, 4-Terminal* [online]. 2018 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/30099/ws13637.pdf>
- [10] RIPKA, P., V. HAASZ a V. PETRUCHA. *Senzory teplotních veličin* [přednáška]. Praha, 2019 [cit. 2020-03-12].
- [11] DIGI-KEY a Jason GUMS. *Types of Temperature Sensors* [online]. 2018 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.digikey.com/en/blog/types-of-temperature-sensors>
- [12] MILIVOJEVIC, Nikola, Marijana PAVLOV-KAGADEJEV a Radojle RADETIC. *The analog linearization of Pt100 working characteristic* [online]. 2015 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/283699020>
- [13] VIOREL, Miron Alexe. *Open Source Device For Ntc Thermistor Curve Representation* [online]. 2018 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/330116411>
- [14] ROOT, Waleri, Thomas BECHTOLD a Tung PHAM. *Textile-Integrated Thermocouples for Temperature Measurement* [online]. 2020 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/338953957>
- [15] JIAN, Cheng Qi a Dylan Dah-Chuan LU. *Review of battery cell balancing techniques* [online]. 2014 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/286651419>
- [16] ANALOG DEVICES, Kevin SCOTT a Sam NORK. *Multicell Voltage Monitoring for Lithium Battery Pack in Electric Vehicles* [online]. 2019 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/tech-articles/Passive-Balancing-Allows-All-Cells-to-Appear-to-Have-the-Same-Capacity.pdf>
- [17] NXP. *Active Cell Balancing in Battery Packs* [online]. 2012 [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN4428.pdf>
- [18] BATTERY UNIVERSITY. *BU-903: How to Measure State-of-charge* [online]. 2019 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_measure_state_of_charge
- [19] AKKUTEILE. *Murata / Sony Konion US18650VTC5 - 2600mAh, 3,6V - 3,7V Flat Top* [online]. [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.akkuteile.de/lithium-ionen-akkus/18650/>
- [20] MURNANE, Martin a Adel GHAZEL. *A Closer Look at State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) Estimation Techniques for Batteries* [online]. 2017 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z:

<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/technical-articles/A-Closer-Look-at-State-Of-Charge-and-State-Health-Estimation-Techniques-....pdf>

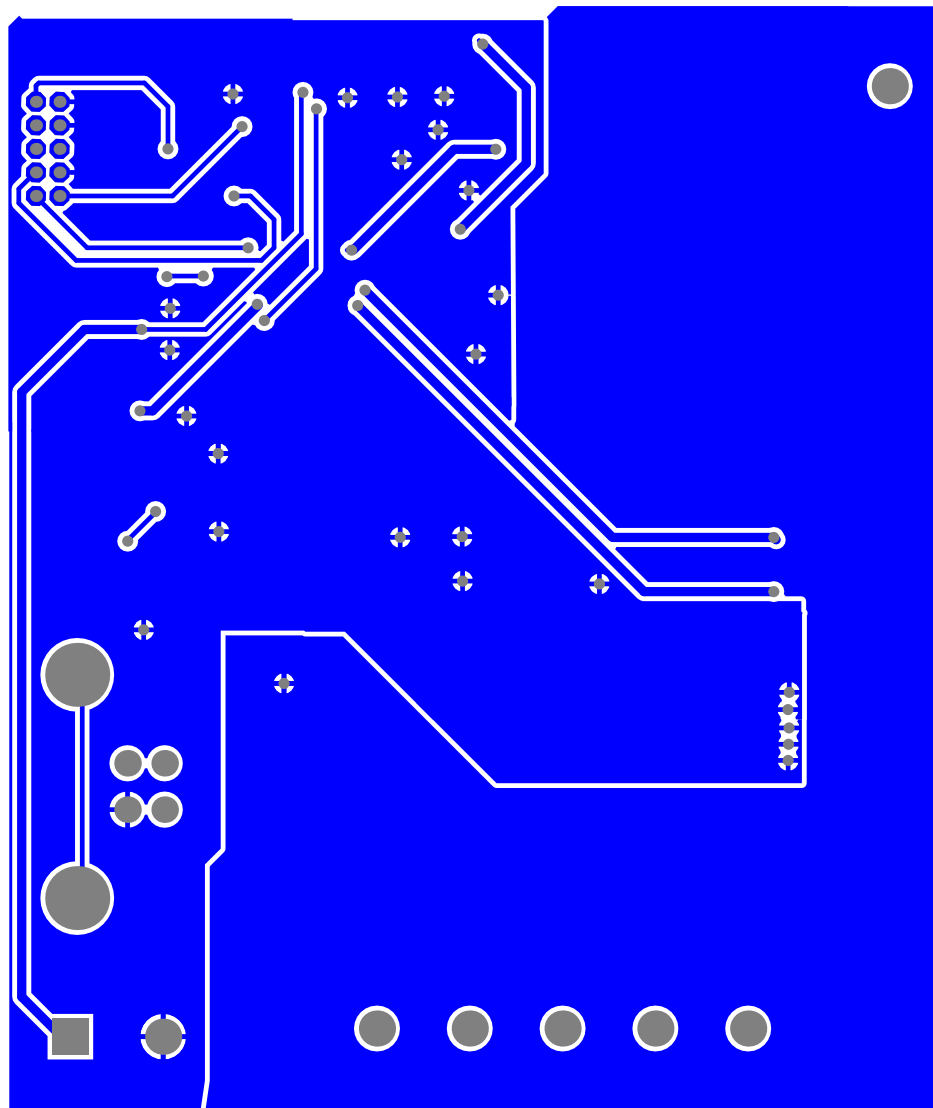
- [21] BACCOUCHE, Ines, Asma MLAYAH, Sabeur JEMMALI, Bilal MANAI, Najoua ESSOUKRI a Najoua ESSOUKRI BEN AMARA. *Implementation of a Coulomb Counting Algorithm for SOC estimation of Li-Ion Battery for Multimedia Applications* [online]. 2015 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/305641470>
- [22] SHARMA, Manisha, Nidhi AGARWAL a s REDDY. *Design and development of daughter board for USB-UART communication between Raspberry Pi and PC* [online]. 2015 [cit. 2020-03-21]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/308828187>
- [23] VISHAY. *Automotive Dual N-Channel 40 V (D-S) 175 °C MOSFETs* [online]. 2019 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/76423/sqj244ep.pdf>
- [24] ON SEMICONDUCTORS. *Low Dropout Regulator, Wide Input Voltage, Low Iq, 300 mA* [online]. 2019 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/NCP718-D.PDF>
- [25] MICROCHIP. *SAM D21/DA1 Family* [online]. 2020 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAM_D21_DA1_Family_Data%20Sheet_DS40001882E.pdf
- [26] SEMITEC. *AT Thermistor* [online]. 2017 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <http://www.semitec.co.jp/uploads/english/sites/2/2017/03/P12-13-AT-Thermistor.pdf>
- [27] TEXAS INSTRUMENTS. *INA186-Q1 Automotive, 40-V Current Sense Amplifier for Cost-Sensitive Systems* [online]. Texas, 2019 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina186-q1.pdf>
- [28] FTDI. *FT230X USB TO BASIC UART IC* [online]. Glasgow, 2016 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: https://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT230X.pdf

Kapitola 6

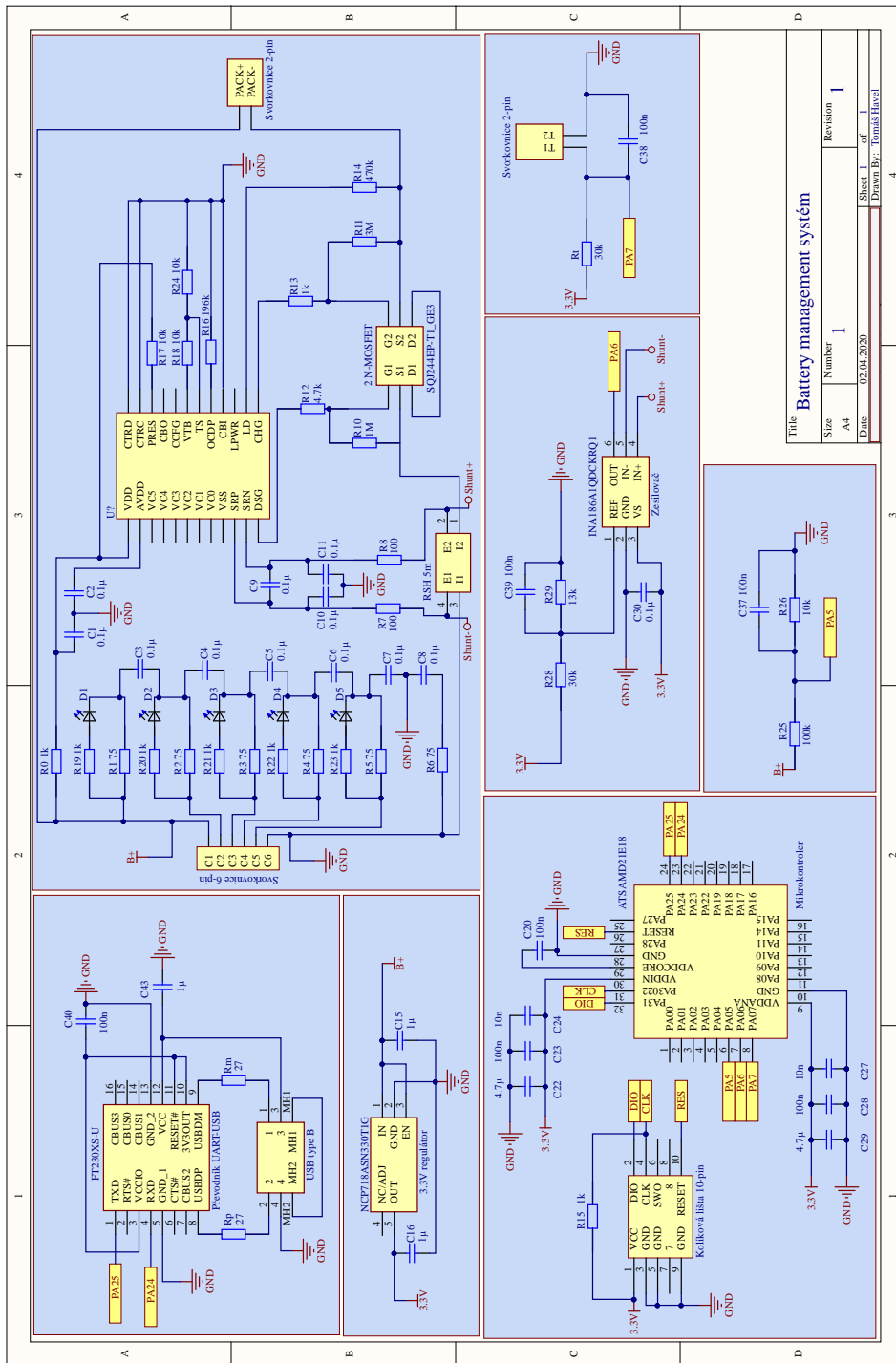
Přílohy



Obrázek 6.1: Horní vrstva návrhu desky plošných spojů



Obrázek 6.2: Spodní vrstva návrhu desky plošných spojů



Obrázek 6.3: Obvodový návrh zapojení