



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

INTELIGENTNÍ LI-ION AKUMULÁTOR

SMART LI-ION BATTERY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Prachař

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. Vojtěch Prachař

ID: 164374

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Inteligentní Li-ion akumulátor

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Zpracujte rešerši týkající se akumulátorů Li-ion, zejména s ohledem na jejich nabíjecí a vybíjecí charakteristiky a jejich specifické vlastnosti.
- 2) Seznamte se s obvody umožňujícími správu (nabíjení/vybíjení) baterií článků na bázi Lithia.
- 3) Navrhněte ucelený systém pro správu n-článekového Li-ion (Li-pol) akumulátoru ($n \geq 4$). Systém autonomně hlídá všechny důležité parametry článků baterie a v přiměřených intervalech loguje jejich aktuální hodnoty. Dále bude řídit korektní nabíjení a vybíjení akumulátoru.
- 4) Navrhněte uživatelské rozhraní pro zobrazení aktuálních i logovaných parametrů baterie. Může být realizováno formou programu v nadřazeném systému (např. PC), nebo formou vestavěného mikropočítače s displejem.
- 5) Realizujte návrhy z bodů 3 a 4.
- 6) Ověřte a vyhodnoťte výsledky Vaší práce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

3 to 5-Series Cell Li-Ion and Li-Phosphate Battery Monitor. TI [online]. [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq76920.pdf>

Termín zadání: 5. 2. 2018

Termín odevzdání: 14.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.

Konzultant:



doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Práce se zabývá lithiovými akumulátory s elektronikou složenými do celku nazývanými „Inteligentní baterie“. V rámci práce jsou vysvětleny hlavní vlastnosti těchto akumulátorů a je navržen a vyroben obvod, který tyto akumulátory hlídá, dokáže je při překročení parametrů odpojit a ukládá historii měření baterie do paměti. Umožňuje také vyčtení aktuálních i logovaných dat o baterii přes UART. Pro komunikaci je navržena počítačová aplikace, která informace přehledně zobrazuje a dokáže upravovat parametry obvodu baterie. Elektronika zajišťuje nabíjení při připojení 24V adaptéru podle nastavených parametrů i balancování jednotlivých akumulátorů.

Klíčová slova

Li-ion, li-pol, BQ76920, nabíjecí charakteristiky, vybíjecí charakteristiky, balancování, nabíjení, ATTINY, inteligentní baterie, snižující měnič

Abstract

The thesis deals with lithium accumulators with electronics, which are composed to a unit called Intelligent Battery. Within this thesis, the main features of these accumulators are explained and the circuit to monitor these accumulators has been designed and manufactured, it can disconnect them when the parameters are exceeded, and it stores the history of the battery measurement in memory. It also allows reading of current and logged battery data via UART. The computer application is designed for communication, to display the information and to adjust the battery circuit parameters. The electronics secure charging when the 24V adapter is connected according to the set parameters and it also secure balancing of the individual accumulators.

Keywords

Li-ion, li-pol, BQ76920, charging characteristics, discharging characteristics, balancing, charging, ATTINY, smart battery, step-down converter

Bibliografická citace:

PRACHAŘ, V. Inteligentní Li-ion akumulátor. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Inteligentní Li-ion akumulátor jsem 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 diplomové 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **10. května 2018**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: **10. května 2018**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Li-ion akumulátory.....	10
2.1	Výhody lithiových akumulátorů	10
2.2	Nevýhody lithiových akumulátorů.....	11
2.3	Vybíjení akumulátoru.....	11
2.4	Nabíjení akumulátoru.....	12
2.5	Teplotní vlivy	13
2.6	Bezpečnost	14
2.7	Inteligentní baterie	14
2.7.1	DJI Intelligent battery	15
3	Obvody pro správu akumulátorů.....	16
3.1	Monitoring	16
3.2	Ochrana	16
3.3	Měřiče stavu nabití.....	16
3.4	Balancování.....	16
3.4.1	Odporové.....	17
3.4.2	Nábojová pumpa	18
3.4.3	DC-DC měnič.....	18
3.5	Obvody pro nabíjení.....	18
4	Obvody pro řízení napětí.....	19
4.1	Pulsně šířková modulace.....	19
4.2	Snižující měnič.....	19
4.3	Zvyšující měnič.....	20
4.4	Lineární regulátor.....	20
5	Návrh řešení	21
5.1	Obvod pro monitoring a ochranu	22
5.1.1	Maxim	22
5.1.2	Intersil	22
5.1.3	Texas Instruments	22
5.2	Řídící mikrokontroler.....	25
5.2.1	PWM výstup mikrokontroleru	27
5.2.2	Paměť EEPROM	27
5.2.3	Digitální izolátor UART.....	28

5.3	Nabíjecí obvod	29
5.4	Měření teploty	34
5.5	Měření vstupního napětí.....	34
5.6	BQ76920 – periferní obvody	35
5.7	Návrh desky plošného spoje.....	37
6	Řídící program.....	38
6.1	Nastavení RTC	39
6.2	Nastavení UART a I2C	40
6.3	Parametrizace a čtení z obvodu BQ76920	41
6.3.1	Parametrizace	41
6.3.2	Čtení	42
6.4	Přenos dat.....	43
6.5	Ukládání dat do EEPROM.....	44
6.5.1	První část.....	45
6.5.2	Druhá část	45
6.5.3	Třetí část.....	46
6.6	Řízení PWM výstupu	46
6.7	Nastavení ADC převodníku	47
6.8	Stav nabití akumulátoru	48
6.9	Nabíjení.....	49
6.10	Tlačítko a signalizační LED.....	50
7	Počítačová aplikace	51
7.1	Data v paketu	53
7.2	Ukládání do souboru	53
8	Testování inteligentní baterie	55
9	Závěr.....	59
	Literatura.....	60
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	62
	Seznam obrázků	63
	Seznam tabulek	65
	Seznam příloh	65
	Obrazové přílohy.....	66

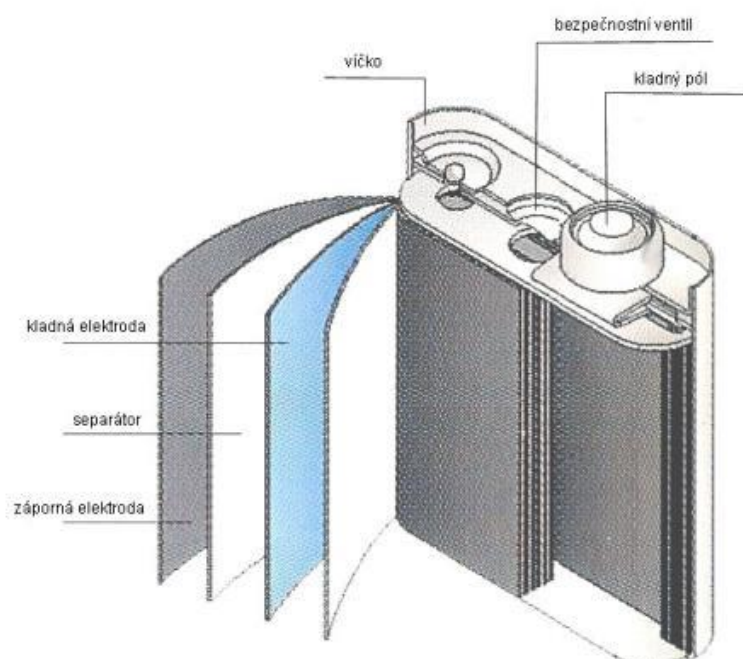
1 ÚVOD

Bez lithiových akumulátorů si v dnešní době už skoro nikdo nedokáže představit život. Používáme je každodenně ve svých mobilních telefonech, notebookech, hodinkách a jiné elektronice. Tento typ akumulátorů se tak rozšířil do našeho života, jelikož dokáže uložit energii do malého a lehkého kvádrů, či válce. A také nepotřebujeme znát, jak s ní zacházet, jako u starších akumulátorů, kde jsme museli dávat pozor například na paměťový efekt. Akumulátor můžeme nabíjet kdy se nám chce, nemusíme dávat pozor, zda má ještě 90 %, nebo už se nám zařízení vypnulo, jelikož v akumulátoru došla energie. Toto pohodlí nám však kromě akumulátoru zajišťuje elektronika, která musí zajistit, aby se akumulátor nedostal do stavů, které jej mohou poškodit nebo zničit. Musí také zajistit, aby se akumulátory správně nabíjely.

Cílem diplomové práce je navrhnout elektroniku, která je součástí inteligentní baterie a hlídá parametry akumulátorů. Zamezuje poškození akumulátorů překročením těchto parametrů a umožňuje nabíjení ze zdroje 24 V. Při nabíjení vyrovnává nabití jednotlivých akumulátorů pro lepší využití kapacity. Informace o baterii zobrazuje pomocí aplikace v počítači a z ní je také možné upravovat parametry nabíjení a ochran akumulátorů. Inteligentní baterie umožňuje logování informací do interní paměti pro pozdější vyčtení.

2 LI-ION AKUMULÁTORY

Li-ion (Li-pol) jsou znovu nabíjitelné elektrochemické akumulátory, které se vyznačují vysokou hustotou uložené elektrické energie vzhledem ke svému objemu a váze. V lithiových akumulátorech se ve výrobě využívá uhlík na zápornou elektrodu, na kladnou elektrodu oxid lithia a kobaltu, niklu, hořčíku a dalších. Elektrody jsou ve formě velmi tenkých folií (stovky μm). Mezi elektrodami je elektrolyt, v li-ion akumulátorech se využívá lithiová sůl rozpuštěná v organickém rozpouštědle. Li-pol je evolucí Li-ion akumulátorů, zde byl nahrazen původní elektrolyt elektrolytem novým z iontově vodivé polymerní sloučeniny. Typické napětí obou typů akumulátorů je 3,60–3,70 V. [1]



Obrázek 2.1 Vnitřní uspořádání lithiového akumulátoru [2]

2.1 Výhody lithiových akumulátorů

- Malé samovybitení – okolo 8 % za měsíc (u NiCd a NiMH až 25 % za měsíc)
- Dlouhá životnost – až 1500 cyklů
- Možnost určit zbývající kapacitu akumulátoru na základě napětí, díky velké změně napětí vůči zbývající kapacitě
- Vysoká hustota uložené energie – 150–200 Wh/kg [1]
- Netrpí paměťovým efektem
- Rychlé dobití na 80 % kapacity

[3]

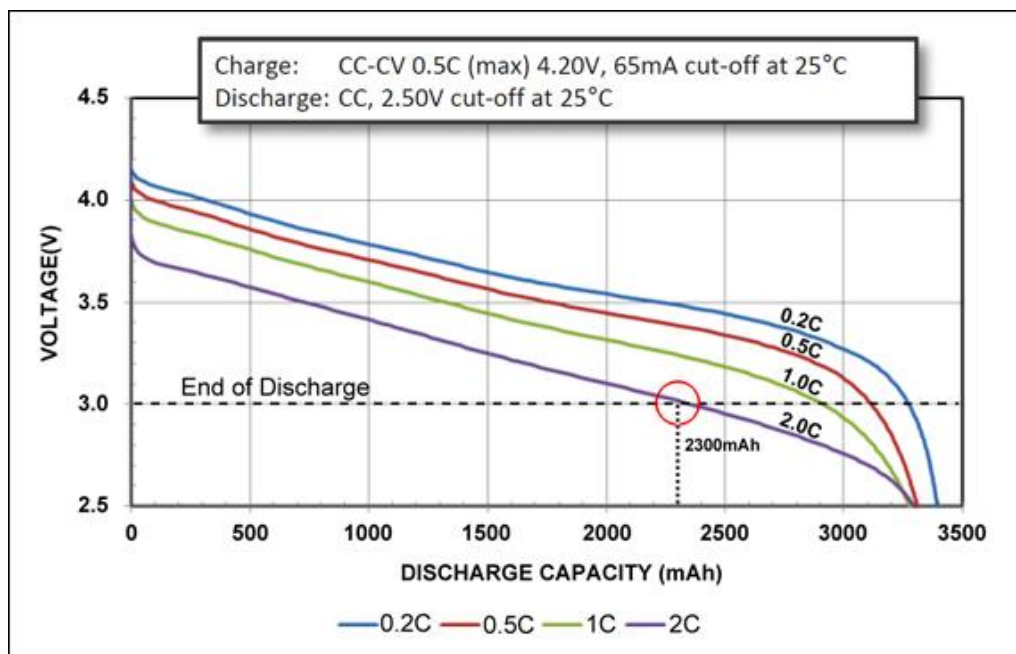
2.2 Nevýhody lithiových akumulátorů

- Vysoký vnitřní odpor (až stovky mΩ; až 10x vyšší než u NiCd)
- Omezený nabíjecí proud – ve většině případů kolem 1,5 C
- Pomalé dobití do plné kapacity
- Nízký výkon při záporných teplotách
- Nutnost ochranných obvodů

[3]

2.3 Vybíjení akumulátoru

Při vybíjení lithiového akumulátoru je nutné kontrolovat jeho parametry. Nejdůležitějším parametrem je jeho napětí, pokud klesne pod povolenou mez, dochází ke snížení životnosti akumulátoru. V horším případě může způsobit jeho zničení, což znamená, že jej nebude možné znovu nabít. Minimální napětí akumulátoru se liší dle výrobce, ale standardně se pohybuje v rozmezí 2,5–3 V. Dalším parametrem je hodnota odebíraného proudu. Překročení tohoto parametru může způsobit snížení životnosti akumulátoru a přehřívání. Hodnota maximálního odebíraného proudu je standardně 1–3 C. To znamená, že pokud je kapacita akumulátoru 2500 mAh a maximální vybíjecí proud 1 C, můžeme jej vybití maximálním proudem 2500 mA. U speciálních akumulátorů se může vyskytovat vyšší hodnota maximálního odebíraného proudu. Při vyšším odběru je ovšem využitelná menší kapacita akumulátoru, kvůli jeho vnitřnímu odporu (viz obrázek 2.2).

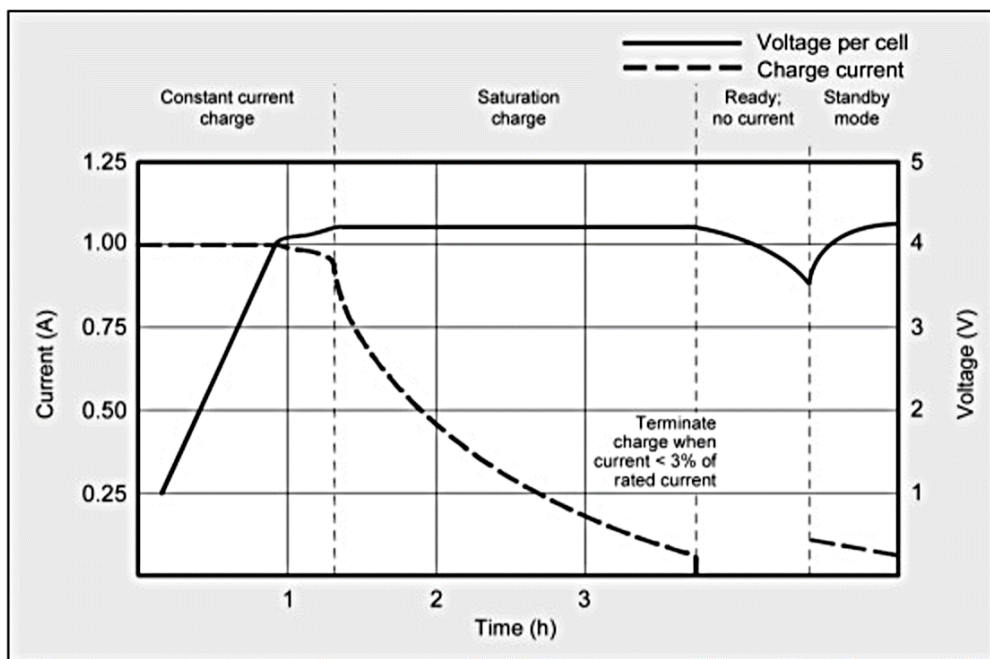


Obrázek 2.2 Vybíjecí charakteristiky v závislosti na proudu [4]

2.4 Nabíjení akumulátoru

Nabíjení lithiových akumulátorů probíhá v nabíjecím cyklu, označovaném zkratkou CC-CV. Tento průběh je zobrazen na obrázku 2.3. V první části nabíjecího cyklu je akumulátor nabíjen konstantním proudem (CC), až do doby, kdy je dosaženo jeho maximální napětí. V tuto chvíli je akumulátor nabit přibližně na 70 % své kapacity [5]. Dále je akumulátor nabíjen konstantním napětím (CV), až do doby, kdy poklesne nabíjecí proud pod nastavenou mez. Obvykle se jedná o 0,03 až 0,05 násobek původního nabíjecího proudu.

Na obrázku 2.3 můžeme také vidět fázi udržovacího nabíjení. Po skončení nabíjení je akumulátor odpojen, do doby, než jeho napětí klesne na 4,00 V. Následně je znovu nabíjen na napětí jen 4,05 V. Tímto se kompenzuje samovybití akumulátoru. [5]



Obrázek 2.3 Graf nabíjení akumulátoru [5]

Maximální napětí akumulátoru se pohybuje v hodnotách 4,20–4,30 V (v závislosti na výrobci a typu akumulátoru). Překročení této hodnoty při nabíjení, již o 30–50 mV, způsobuje zkrácení životnosti akumulátoru. Při vyšším překročení napětí dochází k uvolňování CO₂ a zvyšování tlaku uvnitř akumulátoru. Naopak dobití akumulátoru na nižší napětí, jen o 100 mV, má za následek nevyužití 10 % kapacity. [5]

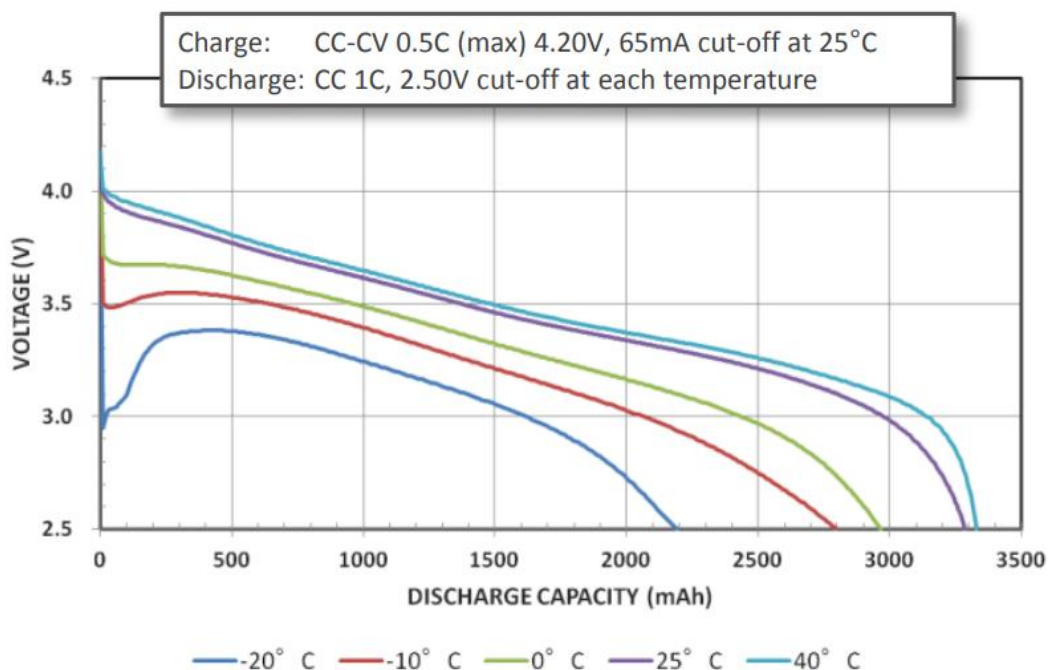
Maximální nabíjecí proud se pohybuje v hodnotách 0,1–1,5 C. U speciálních akumulátorů se může maximální nabíjecí proud dostat k hodnotě desítek C. Nabíjecí proud, na rozdíl od napětí, není nutné udržovat na přesné hodnotě, jelikož použití nižšího proudu nemá negativní efekt na kapacitu, ani životnost. Nabíjení bude probíhat jen delší dobu.

Při hluboce vybitém akumulátoru (napětí nižší než 3–2,5 V) je lepší začít nabíjení s nižším proudem do doby dosažení minimálního napětí akumulátoru a následně je možné pokračovat ve standardním nabíjení.

Nabíjení akumulátoru probíhá obvykle stejnosměrným napětím s malým zvlněním. Nabíjení však může také probíhat pulsně, kdy je nutné zajistit, aby v žádném bodě pulsu nepřekročilo napětí akumulátoru jeho maximální napětí. Tento typ nabíjení se používá z důvodu jednoduššího zapojení, ale nabíjecí čas se prodlouží. Dalším použitelným typem nabíjení je pulsní nabíjení s krátkým záporným pulsem. Nabíjecí obvod je složitější, ale lze dosáhnout rychlejšího nabití a prodloužení životnosti.

2.5 Teplotní vlivy

Jelikož se jedná o chemický akumulátor, má na něj vliv i teplota. Tato teplotní závislost se projevuje jak při vybíjení, tak při nabíjení. Optimální teplota pro používání akumulátoru je 20 °C, pro nabíjení je optimální teplota nepatrně nižší, jelikož se akumulátor při nabíjení sám zahřívá. Teplotní rozsah akumulátoru je standardně od -20 °C do 60 °C. V záporných teplotách je však akumulátor schopen dodávat nižší proud a jeho kapacita je také nižší (může klesnout až k 53 % původní kapacity při -20 °C [4]). Používání při vysokých teplotách má negativní vliv na životnost akumulátoru. Pro nabíjení je rozsah teplot menší, většinou od 0 °C do 45 °C. Každý výrobce udává maximální a minimální teplotu, při které může akumulátor pracovat. Výše jsou uvedeny hodnoty akumulátoru použitého při testování. [27]



Obrázek 2.4 Graf vlivu teploty na průběh vybíjení [6]

2.6 Bezpečnost

Li-ion (Li-pol) akumulátor je tvořen tenkými foliemi z reaktivního lithia a dokáže uložit velké množství energie. Tato kombinace může být při chybném použití velmi nebezpečná. Z tohoto důvodu jsou akumulátory vybaveny pojistkami, mezi které patří tlakový senzor a tepelná pojistka uvnitř něj. Dále jsou některé akumulátory vybaveny elektronickými obvody, které dokáží vyhodnotit jeho parametry a případně jej odpojit, čímž ochrání jak sebe, tak i své okolí. Akumulátory by měly být uloženy v ochranném obalu, který zabraňuje mechanickému poškození.

2.7 Inteligentní baterie

Pojem „inteligentní baterie“ se používá pro jeden, nebo více lithiových akumulátorů vybavených elektronikou, která dokáže získané informace o akumulátorech nějakým způsobem zprostředkovat uživateli. Většinou se jedná o datovou linku do nadřazeného systému. V některých případech je možné se setkat s inteligentními bateriemi, které mají na těle LED pro zobrazení stavu nabití, případně i display.

Elektronika inteligentní baterie musí být schopna ji hlídat před stavy, které by ji mohly poškodit. Dále může obsahovat obvody pro nabíjení akumulátorů.

Základní informace, které inteligentní baterie zobrazuje, je stav nabití.

Další informace, které může zobrazovat jsou:

- Napětí akumulátorů
- Proud nabíjení/vybíjení
- Teplota akumulátorů
- Počet cyklů baterie
- Opotřebení baterie
- Zbývající kapacita baterie
- Čas do nabití/vybití
- Historie baterie

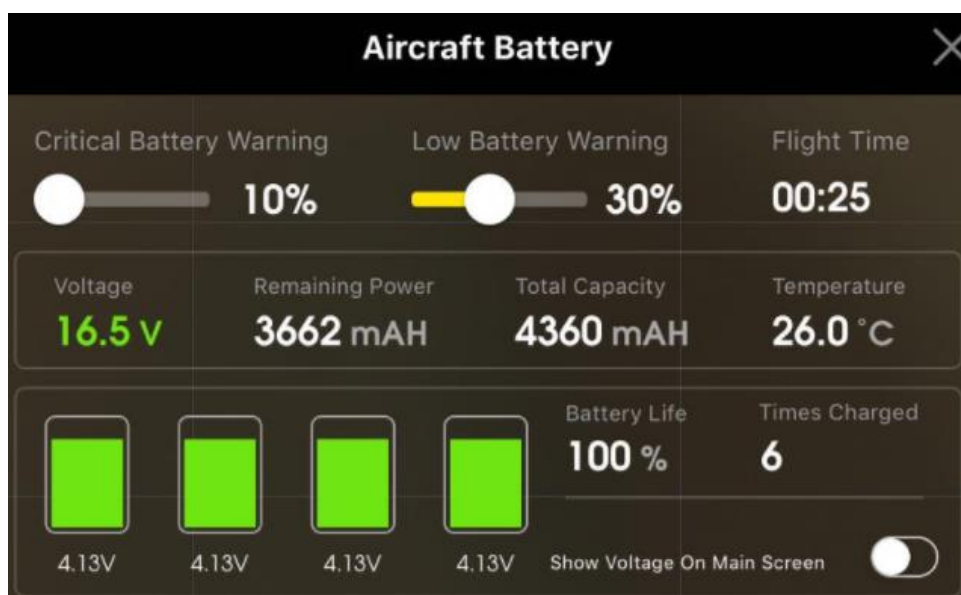
Inteligentní baterie může ukládat svou historii v různých formách:

- Ukládání nedávné historie v intervalech (sekundy až desítky minut). Uživatel se dozví, jak byla baterie nabíjena, vybíjena atd.
- Ukládání delší historie – např. souhrnné denní informace.
- Ukládání důležitých informací o baterii (např. úplné vybití, nadproud).

Příkladem výrobců inteligentních baterií jsou firmy DJI, Tesla, 123SmartBMS a GWL/Power.

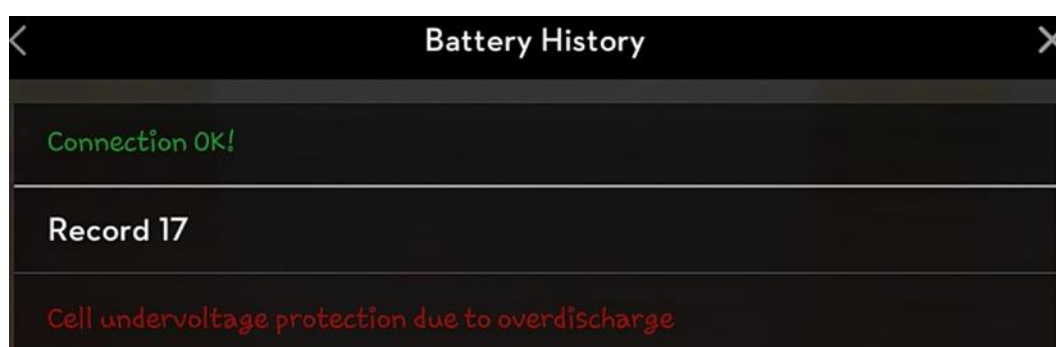
2.7.1 DJI Intelligent battery

Jedním z výrobců inteligentních baterií je firma DJI, která je používá ve svých dronech a jiných malých zařízeních. Pomocí aplikace v mobilním telefonu lze zjistit napětí jednotlivých akumulátorů a zdraví baterie. Dále se zde dozvíme informace o celkové kapacitě baterie, stavu nabití, teplotě a počtu cyklů. Baterie dokáže také podat informaci o odhadovaném čase do vybití. [7]



Obrázek 2.5 Zobrazované informace inteligentní baterie firmy DJI [7]

U baterie nalezneme také její historii, kde se ukládají důležité informace. Níže je vidět záznam o přílišném vybití.



Obrázek 2.6 Logovaná data inteligentní baterie DJI [8]

3 OBVODY PRO SPRÁVU AKUMULÁTORŮ

Obvody pro správu Li-ion (Li-pol) akumulátorů lze rozdělit do několika kategorií podle jejich funkce. Reálné obvody mají jednu, nebo několik těchto funkcí implementovaných. Tyto kategorie jsou: monitoring, ochrana, stav nabití, balancování, nabíjení. (V kapitole použity informace z dokumentů [9] [10] a z katalogových listů [11] [12] [13].)

3.1 Monitoring

Tyto obvody jsou navrženy pro přesné měření napětí všech připojených akumulátorů. Dále měření proudu, kdy také podává informaci o jeho směru. U většiny obvodů je měření realizováno přes analogový multiplexor a jeden ADC převodník. Pokročilejší obvody mají oddělený integrační ADC převodník pro měření proudu. Výstup měření je zpřístupněn nadřazenému systému pomocí sběrnice, případně jsou výsledky ukládány v intervalech do paměti. Některé jednodušší obvody však podávají jen informaci např. o vybitém akumulátoru na binární výstup.

3.2 Ochrana

Některé obvody pro monitoring jsou dále rozšířeny o funkce ochrany akumulátorů. K tomuto účelu mají výstupy pro ovládání tranzistorů, které jsou umístěny v obvodu mezi akumulátory a výstupem. Jeden tranzistor pro vybíjecí proud a druhý pro nabíjecí proud. U většiny obvodů je použito ovládání tranzistorů na záporném pólu baterie z důvodu jednoduššího řízení. Ochrana před vysokým a nízkým napětím akumulátoru je u většiny obvodů realizována porovnáním změřené hodnoty a hodnoty uložené v programu obvodu. Ochrana před nadproudem a zkratem je realizována komparátorem, kvůli vyšší rychlosti reakce. U některých obvodů je možné nastavit napětí komparátoru, při kterém má reagovat.

3.3 Měřiče stavu nabití

Zvláštním typem monitorovacího obvodu je obvod pro měření stavu nabití. Tento údaj určuje podle aktuálního napětí akumulátoru a protékajícího proudu. Pro přesnější určení stavu nabití je však používána kombinace s integrací protékajícího proudu. Některé obvody obsahují i piny pro připojení teplotního čidla ke zpřesnění výpočtu. Na základě zadaných parametrů akumulátoru, teploty, napětí a proteklého proudu dokáže obvod vyhodnotit stav nabití akumulátorů.

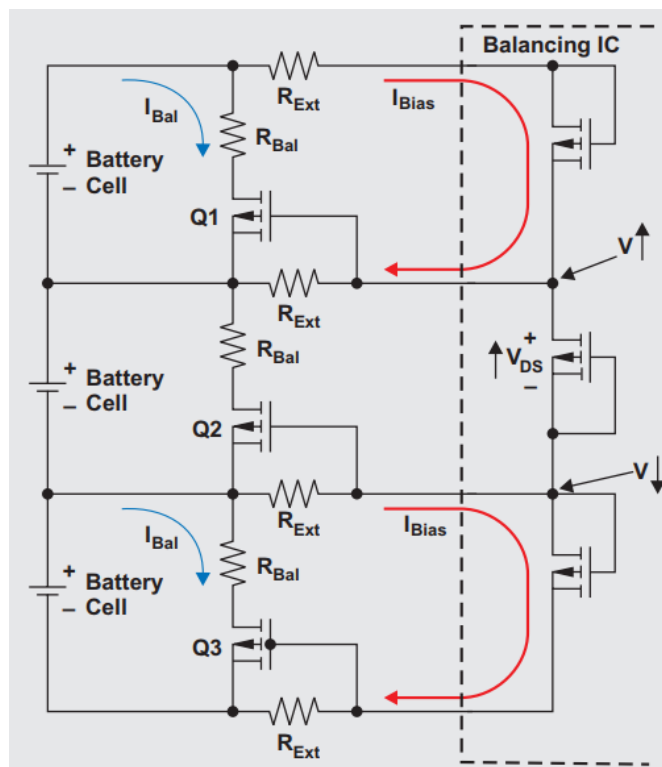
3.4 Balancování

Jelikož jednotlivé akumulátory nemají přesně stejné parametry a lze je zapojit i sériově, objevují se rozdíly v jejich nabití. Z tohoto důvodu by u akumulátorů nebylo možné využít plnou kapacitu. Opakovaným nabíjením a vybíjením by využitelná kapacita dále

klesala. Tento problém řeší balancování akumulátorů, kterých existuje několik typů, z nichž tři nejpoužívanější jsou popsány níže.

3.4.1 Odporové

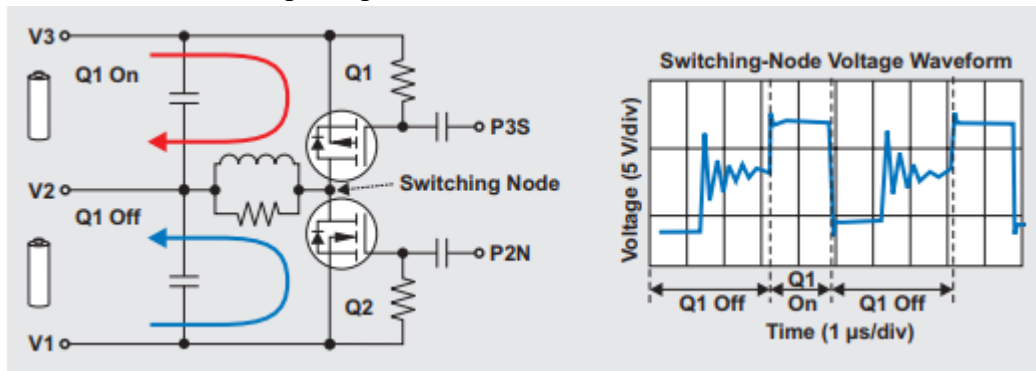
Nejjednodušší a také nejvíce používané balancování akumulátorů je pomocí paralelně připojených rezistorů, které jsou spínány tranzistory. Tento typ se používá jen při nabíjení a to tak, že nejvíce nabitý akumulátor, případně několik akumulátorů, má připojen rezistor a část nabíjecího výkonu se na něm spotřebovává. Tím dojde ke zpomalení nabíjení tohoto akumulátoru a postupnému vyrovnání úrovně nabití (vyrovnání o 1–2 % za jedno nabití). U tohoto typu není možné balancovat dva sousední akumulátory. Důvodem je, že pro otevření externího tranzistoru Q_x je nutné, aby protékal proud přes R_{Ext} u řídicí elektrody tranzistoru (viz šipka proudu na obrázku 3.1). Pokud by byly balancovány akumulátory u tranzistoru Q_1 i Q_2 , netekl by proud přes R_{Ext} řídicí elektrody Q_1 a tranzistor by zůstal uzavřen. U obvodů s interními obvody balancování (nepotřebující externí tranzistor) by při balancování dvou sousedních akumulátorů došlo k překročení maximálního proudu pinem.



Obrázek 3.1 Odporové balancování tří akumulátorů s externím MOSFET tranzistorem [10]

3.4.2 Nábojová pumpa

Metoda balancování pomocí nábojové pumpy se dá jednoduše použít u dvou sériových akumulátorů, ale jsou i obvody pro použití v konfiguraci s více akumulátory. Na obrázku 3.2 je zobrazena situace, kdy je vrchní akumulátor nabitý více než spodní. První je zapnut tranzistor Q1 a energie z vrchního akumulátoru se uloží do cívky ve formě proudu. Následně je tranzistor Q1 vypnut, proud začne téci přes diodu v tranzistoru Q2 a dobíjet spodní akumulátor. Tento průběh je zobrazen také v grafu na obrázku 3.2. (Q1 On: ukládání energie do cívky, Q1 Off: dodávání energie spodnímu akumulátoru a následné vyčerpání energie cívky). Výhodou tohoto řešení je, že energie nikam nemizí, ale jen se přelévá mezi akumulátory (účinnost ~90 %). Tento typ balancování lze tedy použít jak při nabíjení akumulátorů, tak i při jejich vybíjení a umožní nám tedy lepší využití akumulátorů, než při odporovém balancování.



Obrázek 3.2 Balancování akumulátorů nábojovou pumpou [10]

3.4.3 DC-DC měnič

Tento typ balancování potřebuje minimálně jeden obousměrný, galvanicky oddělený DC-DC měnič a multiplexor. Jedna strana konvertoru je připojena na vstup baterie (několik sériově spojených akumulátorů) a druhá strana je připojována pomocí multiplexoru na jednotlivé akumulátory, které dokáže dle potřeby jednotlivě vybíjet, nebo nabíjet.

3.5 Obvody pro nabíjení

Nabíjecí obvod musí zajistit, aby byly akumulátory nabíjeny přesně podle parametrů, které mají uvedeny ve svém katalogovém listu. Musí tedy dokázat udržet přesný nabíjecí proud v první fázi nabíjení. V druhé fázi nabíjení musí být schopen udržet napětí na přesné hodnotě s odchylkou menší než 50 mV. Dále je vhodné sledovat teplotu akumulátorů, aby nedošlo k jejímu překročení.

4 OBVODY PRO ŘÍZENÍ NAPĚTÍ

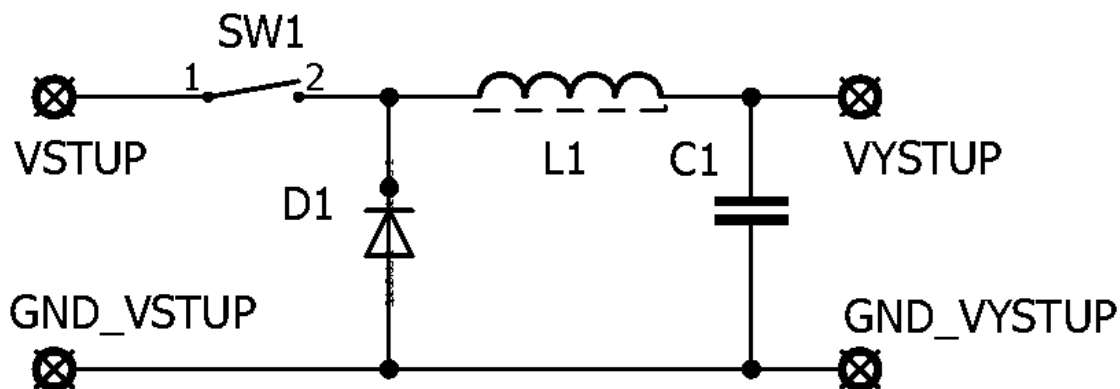
Obvod pro řízení napětí musí být schopen dodávat přesné a regulovatelné výstupní napětí/proud s obecným zdrojem stejnosměrného napětí na vstupu. Dále musí být nabíjecí obvod co nejmenší, jelikož má být součástí baterie. Na základě těchto požadavků jsou vybrány některé možnosti, které jsou rozepsány dále.

4.1 Pulsně šířková modulace

Jedná se o nejjednodušší regulovatelný spínaný zdroj. Skládá se ze spínaného prvku zapojeného sériově mezi zdroj a spotřebič a paralelně k výstupu zapojeného kondenzátoru pro vyhlazení napětí. Řízením střídy spínání je regulováno výstupní napětí. Výhodou tohoto obvodu je jeho jednoduchost. Nevýhodou je potřeba kondenzátoru s vysokou kapacitou na výstupu, jelikož musí dodávat energii na výstup po dobu, kdy je spínač vypnut. Použití kondenzátoru s nižší kapacitou má za následek velké zvlnění.

4.2 Snižující měnič

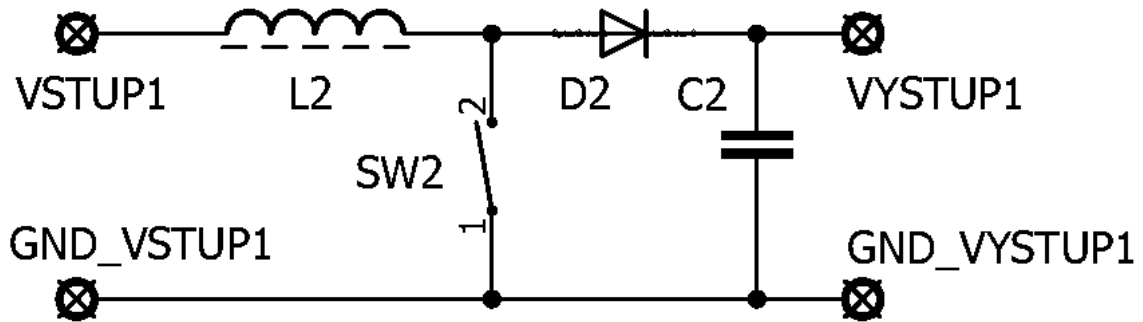
Snižující měnič vychází z obvodu v předchozí kapitole, s tím rozdílem, že má dva akumulární prvky. Pokud je spínač SW1 sepnut, proud teče na výstup a zároveň se akumuluje v cívce L1 a kondenzátoru C1. Následně je spínač SW1 rozeprnut a v cívce se začne indukovat proud, který teče přes diodu D1 a cívku L1. O výstupní napětí s nízkým zvlněním se zde tedy starají dva akumulární prvky, proto je možné použít kondenzátor s nižší kapacitou. V reálné aplikaci je spínačem tranzistor řízený PWM signálem.



Obrázek 4.1 Schéma snižujícího měniče

4.3 Zvyšující měnič

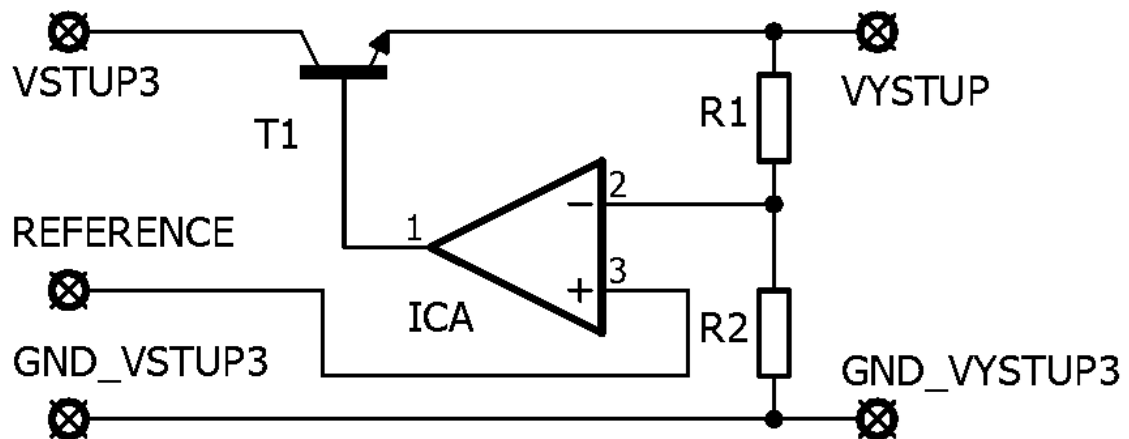
Zvyšující měnič, jako jediný z uvedených zapojení, dokáže dodávat na výstupu vyšší napětí, než má na vstupu. Tohoto je docíleno cívkou L2, ve které se akumuluje energie, když je sepnut spínač SW2. Poté je spínač rozeprt, a cívka L2 se stává zdrojem proudu, který protéká přes diodu D2 na výstup.



Obrázek 4.2 Schéma zvyšujícího měniče

4.4 Lineární regulátor

Lineární regulátor pracuje na principu vloženého odporu, kdy je pro protékající proud proměnlivou zátěží, nejčastěji řešenou bipolárním tranzistorem. Tento typ regulace má však velmi nízkou účinnost, neboť veškerý přebytečný výkon je přeměňován na teplo. Níže je schéma reálné aplikace, kde je regulátor řízen referenčním napětím na vstupu REFERENCE například z DAC převodníku mikrokontroleru. Děličem R1, R2 se nastavuje zesílení výstupního napětí vůči napětí referenčnímu.



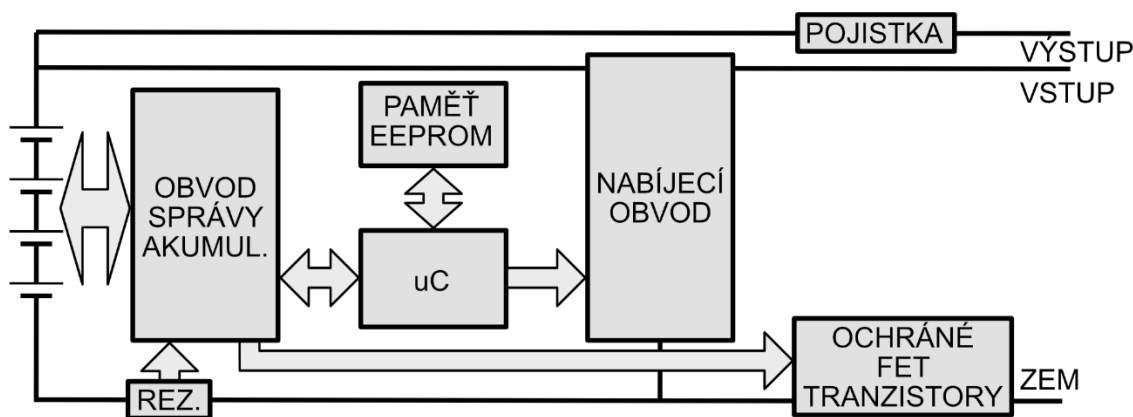
Obrázek 4.3 Schéma řízeného lineárního stabilizátoru

5 NÁVRH ŘEŠENÍ

Při návrhu řešení je kladen důraz na následující požadavky:

- Funkčnost se čtyřmi lithiovými akumulátory
- Nabíjecí proud až 3 A
- Vybíjecí proud až 4,5 A
- Nabíjení ze stejnosměrného zdroje 24±2 V
- Ochrana akumulátorů proti podpětí a přepětí
- Ochrana akumulátorů proti nadproudu a zkratu
- Ochrana akumulátorů před nízkou a vysokou teplotou
- Balancování akumulátorů
- Měření napětí akumulátorů
- Integrace proudu baterie (měření proudu)
- Ukládání historie
- Komunikace s počítačovou aplikací zobrazující parametry baterie

Navrhované řešení se skládá z obvodu správy akumulátorů, který zahrnuje obvod pro monitoring měřící napětí akumulátorů a proud z/do akumulátorů. Dále obvod pro ochranu, který dokáže pomocí ochranných FET tranzistorů odpojit akumulátory v případě překročení jejich parametrů a obvod pro balancování, který zajišťuje, aby byly akumulátory nabity na stejné napětí. Druhou částí je mikrokontroler (μC), který komunikuje s obvodem pro správu akumulátorů přes I2C (TWI) a získaná data zpracovává. Zpracovaná data zpřístupňuje nadřazenému systému přes UART, případně ukládá do externí paměti. Mikrokontroler také řídí zdroj pro nabíjení akumulátorů.



Obrázek 5.1 Grafické zobrazení návrhu

5.1 Obvod pro monitoring a ochranu

Pro rešerši jsou vybrány integrované obvody tří výrobců, které splňují požadované vlastnosti, nebo tyto vlastnosti splňují částečně. Pro návrh obvodu je vybrán třetí integrovaný obvod z rešerše od firmy Texas Instruments, jako nejvíce vyhovující, jelikož slučuje všechny požadované funkce do jednoho integrovaného obvodu. Dále je také nejlevnější a nejjednodušší pro integraci do obvodu.

5.1.1 Maxim

Tento výrobce nabízí několik typů obvodů, například obvod pro určení stavu nabití akumulátorů, který kombinuje integraci proteklého proudu a napětí akumulátoru. Toto řešení má bohužel pouze pro jediný akumulátor i s jeho ochranou, nebo pro více akumulátorů, ale s nutností přidat ochranu akumulátorů dalším obvodem.

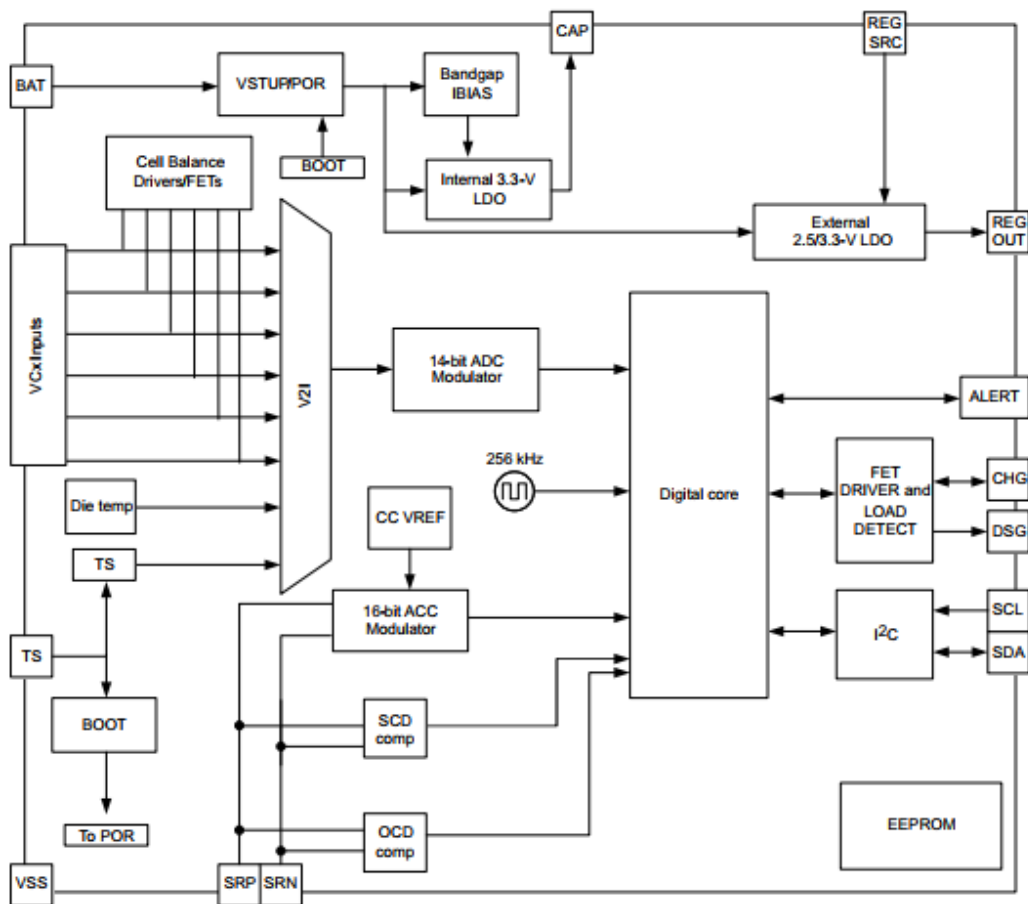
Nejblíže požadavkům odpovídá obvod DS2762, tento obvod má vyvedeny piny pro ochranu baterie, ale limity nejsou programovatelné pomocí sběrnice. Další nevýhodou je sdílený převodník pro měření napětí i pro měření proudu. [11]

5.1.2 Intersil

Od tohoto výrobce je do rešerše vybrán obvod ISL94203. Obvod umožňuje ochranu akumulátorů pomocí řídicích pinů pro tranzistory na kladném pólu akumulátorů. Má také řídicí piny pro připojení tranzistoru k nabíjení hluboce vybitých akumulátorů. Dokáže komunikovat s nadřazeným systémem pomocí I2C a také má možnost nastavení limitů napětí a proudu. Další výhodou obvodu je detekce proudu i pokud je obvod v režimu spánku, obvod však provádí měření proudu v intervalech, a ne integrujícím převodníkem. Dále je obvod s příliš mnoho vývody, jelikož podporuje připojení až osmi akumulátorů, což by ztěžovalo výrobu plošného spoje. [12]

5.1.3 Texas Instruments

Od toho výrobce je vybrán obvod BQ76920. Obvod umožňuje ochranu akumulátorů pomocí vyvedených pinů pro tranzistory na záporném pólu akumulátorů. Umožňuje balancování akumulátorů a jejich měření. Dále má obvod samostatně řešený převodník pro měření proudu, v datovém listu označovaném jako „coulomb counter“, což znamená, že integruje procházející proud po celou dobu. Data o měření jsou zpřístupněna přes I2C a přes tuto sběrnici je možné obvod také parametrizovat. Pro nadřazený obvod (μC) má vyvedený napájecí výstup 3,3 V. [13]



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

Obrázek 5.2 Blokové schéma vnitřního uspořádání obvodu BQ76920 [13]

Údaje níže jsou zpracovány na základě katalogového listu výrobce [13]. Obvod je určen pro monitoring a ochranu tří až pěti akumulátorů. Další verze tohoto obvodu umožňují monitoring a ochranu až 15 akumulátorů, kdy ve vnitřním uspořádání jsou 2x, nebo 3x nad sebou obvody pro balancování a měření akumulátorů, další části zůstávají stejné.

Obvod obsahuje 14bitový ADC převodník, který umožňuje přes analogový multiplexor měření napětí akumulátorů a měření interním, nebo externím teploměrem. Změřené hodnoty jsou uloženy a lze je vyčíst přes sběrnici I2C. Dále jsou změřená napětí využívána pro ochranu akumulátorů, kdy jádro vyhodnocuje, zda nedošlo k překročení minimálního, nebo maximálního napětí akumulátorů, které je nastaveno v jeho paměti. Chyba převodníku v rozsahu měřeného napětí 3,60–4,30 V je ± 10 mV při teplotě 25 °C, v rozsahu napětí 2,0–5,0 V je chyba již vyšší, a to ± 25 mV.

Každý měřicí pin má ještě druhou funkci – balancování akumulátorů. Obvod má vnitřní FET tranzistory, které společně s připojenými rezistory dokáží balancovat akumulátor. Omezením je maximální proud 50 mA a nemožnost balancovat dva akumulátory v těsném sousedství.

Dále se zde nachází 16bitový integrační ADC převodník (Coulomb counter). Ten integruje procházející proud po dobu 250 ms. Dokončení převodu je signalizováno na pinu ALERT. Převodník může pracovat v režimu „one shot“, kdy na vyžádání provede

jeden převod, nebo v kontinuálním režimu, kdy dodává nové informace každých 250 ms. Přesnost převodníku je závislá na použitém rezistoru pro měření proudu. U samotného převodníku je chyba zesílení $\pm 0,5\%$, chyba offsetu 1 LSB a chyba linearity 2 LSB (LSB = 8,44 μV). Rozsah měřitelných hodnot je $\pm 270\text{ mV}$, pro měření je však doporučeno použít rozsah do $\pm 200\text{ mV}$ (ochrana proti nadproudu max. $\pm 100\text{ mV}$). Kromě ADC převodníku jsou na měřicí vstup připojeny dva nastavitelné komparátory. První „OCD“ pro detekci nadproudu a druhý „SCD“ pro detekci zkratu.

K řízení tranzistorů se zde nachází dva budiče, které ovládají tranzistory napětím 12 V. Pro mikrokontroler je vyvedena I2C sběrnice, která může fungovat v režimu 100 kHz. Součástí katalogového listu výrobce [13] jsou i doporučení pro konstrukci plošného spoje, aby bylo měření co nejpřesnější.

Výrobce	Maxim [11]	Intersil [12]	Texas Instruments [13]
Typ	DS2762	ISL94203	BQ76920
Ochrana přepětí	Ano	Ano	Ano
Ochrana podpětí	Ano	Ano	Ano
Programovatelné limity	Ne	Ano	Ano
Separátní měření proudu a napětí	Ne	Ne	Ano
Rozhraní I2C	Ne	Ano	Ano
Měření teploty	Ano	Ano	Ano
Cena	195 Kč	125 Kč	62 Kč

Tabulka 5.1 Srovnání obvodů od tří výrobců

5.2 Řídící mikrokontroler

Nejdůležitější částí elektroniky inteligentní baterie je mikrokontroler. Ten je vybrán od firmy Atmel (Microchip), zvláště kvůli jejich vývojářskému prostředí, vlastnění programátoru a zkušenostem s vývojem aplikací na mikrokontrolerech této firmy.

Hlavní požadavky na mikrokontroler:

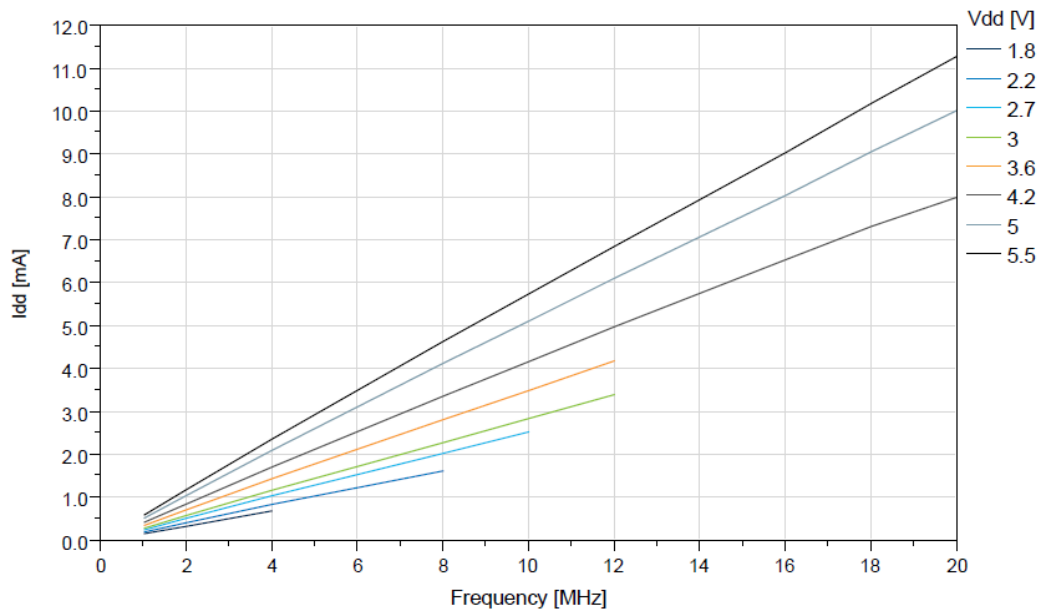
- Nízká spotřeba
- Komunikační rozhraní I2C a UART
- PWM výstup
- ADC převodník

Na základě těchto požadavků je vybrán mikrokontroler z nejnovější řady Attiny. Pro aplikaci je dostačující Attiny 1616.

Základní parametry [14]:

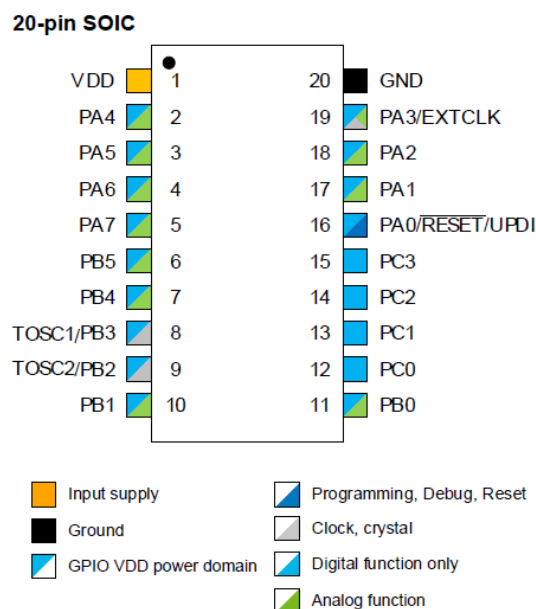
- AVR 8-bit CPU s nízkou spotřebou
- Dvou–cyklová hardwarová násobička
- Integrovaný 16/20 MHz oscilátor s nízkou spotřebou
- Rozhraní I2C, UART a SPI
- 12bitový časovač optimalizovaný pro řídicí aplikace
- ADC s interními referencemi
- Programování pomocí jednoho pinu (UPDI)
- 18 programovatelných vstupů/výstupů
- Paměť:
 - 16 KB programovatelné Flash paměti
 - 256 B EEPROM
 - 2 KB SRAM
- Pracovní napětí 1,8–5,5 V
- Maximální frekvence při 3,3 V: 8 MHz

Pro úsporu energie běží mikrokontroler na frekvenci 3,33 MHz, což je dostatečná frekvence pro správnou funkci potřebných rozhraní i pro vykonávání programu. Při této frekvenci a napájecím napětí 3,3 V je spotřeba dle grafu ~1,1 mA v aktivním stavu (viz obrázek 5.3). Vysoká frekvence je ale potřeba pro řízení PWM výstupu. Vybraný mikrokontroler však podporuje funkci jednoho čítače/časovače na jiné frekvenci, než je frekvence jádra (viz kapitola 5.2.1).



Obrázek 5.3 Spotřeba energie mikrokontroleru v aktivním stavu v závislosti na frekvenci [14]

Rozhraní I2C, SPI a UART mají vlastní generátor hodin odvozený od hodin systémových. Piny těchto sběrnic jsou předdefinovány, je možné vybrat vždy ze dvou umístění pinů. Většina pinů má pak mnoho alternativních funkcí. Pro programování je využít pouze jeden pin – rozhraní UDPI.



Obrázek 5.4 Rozložení pinů mikrokontroleru [14]

5.2.1 PWM výstup mikrokontroleru

Mikrokontroler má pro řízení PWM výstupu 4 čítače. Čítač A, dva čítače B a čítač D. První 3 čítače mají společnou nevýhodu, jsou vázány na frekvenci z děliče pro hodiny, které jsou použity např. pro CPU (3,33 MHz). Čítač D je však vytvořen speciálně pro výkonové aplikace a má vlastní dělič frekvence od základních hodin. Toto uspořádání umožňuje použití frekvence 20 MHz pro generování PWM signálu. Tento čítač je 12bitový, ale pro generování je v praxi použito 9 bitů, což znamená 512 úrovní a frekvenci signálu 39,06 kHz. Při vstupním napětí $U_{vst} = 24$ V vychází následující krok výstupního napětí (rovnice 5.1). [14]

$$\Delta U = \frac{U_{vst}}{\text{počet úrovní}} = \frac{24}{512} = 0,0469 \text{ V} \quad (5.1)$$

Tento krok je však pro přesné řízení nedostatečný, proto je použito mírné vylepšení v podobě variabilní frekvence PWM. (viz Tabulka 5.2)

Stav čítače pro změnu úrovně	Stav čítače pro reset	Výstupní napětí [V]
210	511	14,1094
209	509	14,1177
209	510	14,1370
209	511	14,1563

Tabulka 5.2 Ukázka funkce generování PWM

$$U_{vyst} = U_{vst} \cdot \frac{T - T_{HI}}{T + 1} = 24 \cdot \frac{511 - 210}{511 + 1} = 14,1094 \text{ V} \quad (5.2)$$

Kde U_{vyst} Výstupní napětí
 U_{vst} Vstupní napětí
 T Stav čítače pro reset
 T_{HI} Stav čítače pro zapnutí výstupního signálu (změnu úrovně)

Touto úpravou je dosaženo kroku napětí na výstupu o hodnotě maximálně 23,5 mV na rozsahu 10–16,8 V při stejné frekvenci základních hodin a mírné manipulaci s frekvencí výstupního signálu. Frekvence PWM výstupu je tedy 39,06–39,22 kHz. Softwarová část viz kapitola 6.6.

5.2.2 Paměť EEPROM

Data o nabíjení, vybíjení a další informace je nutné ukládat do paměti. Jelikož samotný mikrokontroler obsahuje pouze 256 B EEPROM, je nutné přidat externí paměť. Pokud vybereme paměť 16 kb, vejde se do ní 512 záznamů krátké historie, nebo 292 záznamů dlouhé historie. U dlouhé historie se jedná skoro o rok, v případě krátké historie, při ukládání jednou za minutu, o osm a půl hodiny. Obě hodnoty jsou pro dobu ukládání dostatečné, proto je zvolena paměť 32 kb, jakožto součet těchto dvou oblastí. Pokud by

byly doby historie krátké, je možné nahradit paměť vyšší kapacitou, nebo zvolit méně časté ukládání u krátké historie (více v kapitole 6.5).

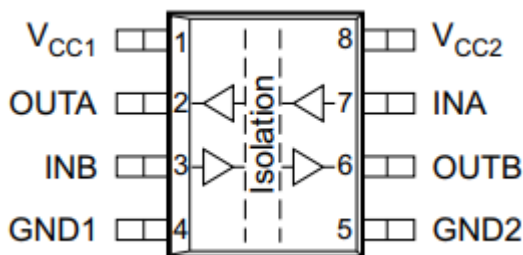
Paměť je zvolena od stejného výrobce jako je výrobce mikrokontroleru. Jedná se o paměť Atmel AT24C32D. Paměť pro komunikaci používá rozhraní I2C, má relativně nízkou spotřebu a životnost 1 milion zápisů. Tato životnost znamená, že při ukládání krátké historie jednou za minutu (zápis do buňky jednou za 8,5 hodiny) vydrží paměť 970 let.

Rozhraní	I2C
Velikost paměti	32 kb
Typ paměti	EEPROM
Zapisovacích cyklů	1 000 000
Spotřeba při čtení (CLK = 400 kHz, Vdd = 5 V)	0,4 mA
Spotřeba při zápisu (CLK = 400 kHz, Vdd = 5 V)	2,0 mA
Spotřeba při nečinnosti (Vdd = 5 V)	6,0 uA (1,0 uA při Vdd = 1,7 V)
Napájecí napětí (Vdd)	1,7–5,5 V

Tabulka 5.3 Parametry paměti EEPROM [15]

5.2.3 Digitální izolátor UART

Připojené zařízení (PC), které bude komunikovat s obvodem, může být na jiném potenciálu, a mohlo by dojít k poškození obvodu protékajícím proudem. Případně by mohlo dojít k poškození statickou elektřinou. Z tohoto důvodu je výstup izolován pomocí obvodu ISO7421DR. Kromě izolace dovolí také komunikaci jak s rozhraním fungujícím na napětí 3,3 V, tak 5 V.



Obrázek 5.5 Digitální izolátor ISO7421DR [16]

5.3 Nabíjecí obvod

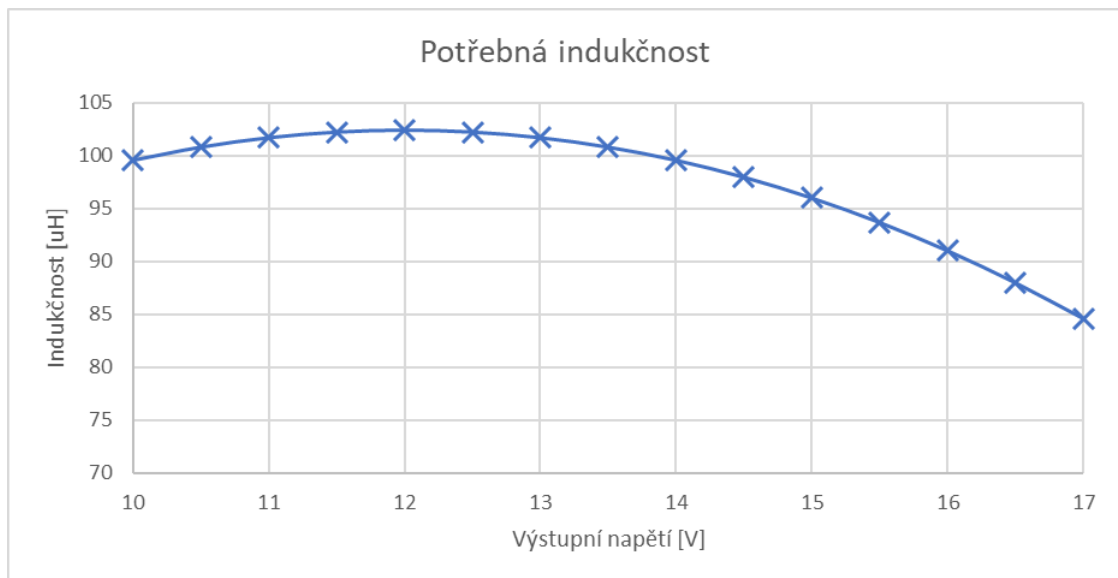
Pro nabíjení je z rešerše možností vybrán snižující měnič, jelikož požadavkem je napájení ze 24V stejnosměrného zdroje a pro nabíjení je třeba napětí 10–17,2 V ($4 \cdot 2,5$ – $4,3$ V). Dále je také vhodný pro požadovaný proud 3 A, kde zajistí dobrou účinnost (60–95 %). Pro řízení je použit PWM signál z mikrokontroleru o frekvenci $f=39,06$ kHz.

Ve výkonové části je nutné první vypočítat hodnoty LC filtru, který se stará o vyhlazení výstupu ze spínaného tranzistoru. Jelikož jsou ve filtru dva akumulární prvky, je nutné zvolit parametr jednoho z nich. Tímto parametrem je rozkmit proudu cívkou ΔI , který by měl být maximálně 50 % výstupního proudu zdroje. Pro obvod je zvolena právě tato hodnota, tedy $\Delta I=1,5$ A. Dále je nutné určit požadované maximální zvlnění výstupu. Jelikož akumulátor může poškodit již přepětí 30–50 mV, je zvolené maximální zvlnění menší než polovina této hodnoty, a to: $\Delta U=25$ mV. Vyšší požadavky na kvalitu výstupu by měly negativní vliv na výslednou velikost obvodu. Z těchto parametrů je vypočítána potřebná indukčnost cívky (rovnice 5.3).

Výpočet indukčnosti [17]:

$$L = \frac{1}{f} \cdot (1 - p) \cdot \frac{U_{vyst}}{\Delta I} = \frac{1}{39,062 \cdot 10^3} \cdot (1 - 0,5) \cdot \frac{12}{1,5} = 102,4 \mu H \quad (5.3)$$

Hodnoty vypočtené indukčnosti jsou vyneseny do grafu (Obrázek 5.6), kde je vidět, že nejvyšší hodnota vychází při střídě $p=50$ %.



Obrázek 5.6 Graf potřebné indukčnosti v závislosti na výstupním napětí (vstupní napětí = 24 V)

Dalším požadavkem na cívku je maximální stejnosměrný proud, který je roven součtu maximálního proudu nabíjecího obvodu a poloviny rozkmitu.

$$I_L = I + \frac{\Delta I}{2} = 3 + \frac{1,5}{2} = 3,75 A \quad (5.4)$$

Těmto parametrům odpovídá nejbližše feritová cívka MSS1583-104, jejíž parametry jsou [18] [19]:

- Indukčnost 100 μH při frekvenci 100 kHz
- Stejnoseměrný odpor 0,09 Ω
- Saturační proud 3,9 A (pokles indukčnosti o 10%)
- Maximální teplota cívky 125 $^{\circ}\text{C}$

Jelikož je indukčnost cívky nejvíce závislá na frekvenci a procházejícím stejnosměrným proudem, je nutné ověřit její vlastnosti i při těchto parametrech. Cívka je určena pro zdroje, proto má výrobce na svých webových stránkách možnost výpočtu parametrů cívky na základě uživatelem zadaných hodnot.

Stejnoseměrný proud [A]	Indukčnost cívky [μH]
1	99,97
2	98,97
3	96,35
3,75	91,52

Tabulka 5.4 Indukčnost cívky v závislosti na stejnosměrném proudem při frekvenci 39 kHz [19]

- Hodnota indukčnosti pro frekvence do 1 MHz je 100 μH .
- Ztráty ve vodiči a ztráty v jádře jsou maximálně 0,957 W
- Tyto ztráty ohřejí cívku maximálně o 49 $^{\circ}\text{C}$

[19]

Druhou částí LC filtru je kondenzátor.

Výpočet hodnoty kondenzátoru [17]:

$$C = \frac{\Delta I}{f \cdot 8 \cdot \Delta U} = \frac{1,5}{39,062 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 25 \cdot 10^{-3}} = 192 \text{ uF} \quad (5.5)$$

Pro lepší schopnost filtrace je tato kapacita tvořena třemi kondenzátory s nízkým odporem o kapacitě 3 * 68 μF . Celková kapacita je tedy 204 μF .

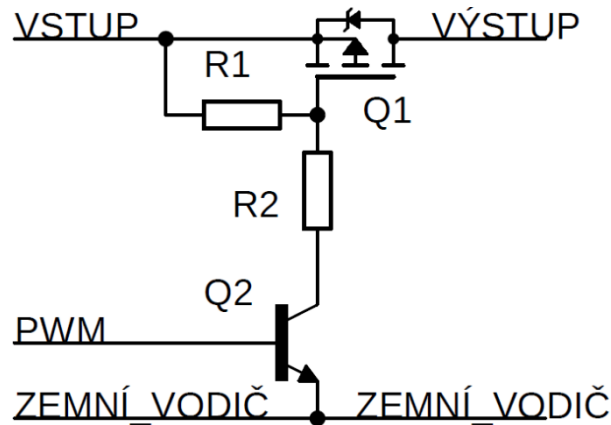
Jelikož jsou použity součástky s mírně rozdílnými parametry, než vyšly výpočtem, je nutné zpětně ověřit parametry při maximálním proudem:

$$\Delta I = \frac{1}{f} \cdot (1 - p) \cdot \frac{U_{out}}{L} = \frac{1}{39,062 \cdot 10^3} \cdot (1 - 0,5) \cdot \frac{12}{91,52 \cdot 10^{-6}} = 1,678 \text{ A} \quad (5.6)$$

$$\Delta U = \frac{\Delta I}{f \cdot 8 \cdot C} = \frac{1,678}{39,062 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 204 \cdot 10^{-6}} = 26,3 \text{ mV} \quad (5.7)$$

Výsledné zvlnění nabíjecího obvodu je o 1,3 mV vyšší, než je požadované. Tato odchylka je však vzhledem k požadavkům akceptovatelná.

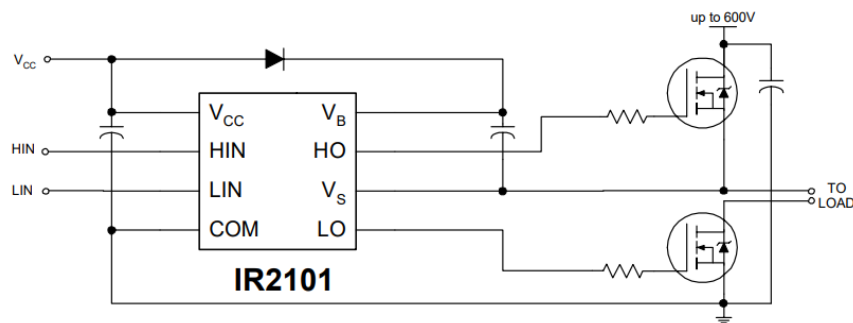
Další částí zdroje je spínací MOSFET tranzistor, který je ovládán PWM signálem z mikrokontroleru. Jelikož je tranzistor umístěn na kladném pólu, kde je napětí 24 V, je nutné použít pro ovládání budič. Nejjednodušším budícím obvodem je odporový dělič s tranzistorem (Obrázek 5.7).



Obrázek 5.7 Řízení tranzistoru odporovým děličem

Jelikož má MOSFET tranzistor mezi gate a source kapacitu, bylo by nutné použít rezistory s nízkým odporem pro strmé hrany spínání. To by však znamenalo, že při otevřeném řídicím tranzistoru poteče řídicím obvodem velký ztrátový proud. Pokud by byl použit odpor s vyšší hodnotou, MOSFET tranzistor by se zavíral pomalu, což by způsobovalo vyšší ztráty a zahřívání.

Vzhledem k výše zmíněnému a k řídicí frekvenci 39 kHz není možné toto zapojení použít. Pro řízení je tedy použit specializovaný obvod „High-side driver“. Pro toto zapojení je vybrán obvod IR2101, který má dle dokumentace typickou dobu vypnutí 50 ns a dobu zapnutí 100 ns. [20]



Obrázek 5.8 Zapojení high-side driveru [20]

Obvod dokáže řídit tranzistor N-MOSFET napětím 10–20 V, které si vytvoří na kondenzátoru mezi piny V_S a V_B . Na řídicím vstupu je kompatibilní s napětím 3,3 V a nevyžaduje připojení obou tranzistorů na výstupu. Obvod pro svou funkci vyžaduje napájecí napětí 10–20 V. [20] Jelikož je na vstupu nabíjecího obvodu 24 V, je pro napájení budiče použit 18V lineární stabilizátor 78L18, který dokáže pracovat se vstupním napětím až 35 V.

Pomocí obvodu IR2101 je spínán N-MOSFET tranzistor CSD17581Q5A. Právě tento tranzistor je vybrán kvůli jeho dobrým parametrům: nízký odpor v sepnutém stavu a rychlost spínání (nízká kapacita spínací elektrody). Dalším parametrem je proud tranzistorem, který je maximálně 3,75 A, což dle tabulky 5.5 tranzistor splňuje s velkou rezervou.

Odpor mezi otevřeným drain a source	2,9 mΩ
Maximální trvalý proud	24 A
Maximální blokovací napětí	30 V
Doba zapnutí	21 ns
Doba vypnutí	10 ns
Kapacita elektrody gate (10 V)	41 nC

Tabulka 5.5 Parametry tranzistoru CSD17581Q5A [21]

Na tranzistoru budou při spínání vznikat ztráty (pro výpočet použity horší časy – tzn. časy high-side driveru)

Ztrátový výkon při spínání bude maximálně:

$$P_{ZS} = \frac{1}{2} \cdot f \cdot (t_{on} + t_{off}) \cdot U_{vst} \cdot I_{vyst} =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 39,06 \cdot 10^3 \cdot (100 \cdot 10^{-9} + 50 \cdot 10^{-9}) \cdot 24 \cdot 3 = 210,9 \text{ mW} \quad (5.8)$$

Kde t_{on} doba zapnutí tranzistoru (high-side driveru)
 t_{off} doba vypnutí tranzistoru (high-side driveru)
 I_{vyst} výstupní proud
 U_{vst} vstupní napětí

Ztrátový výkon na odporu tranzistoru (zanedbána doba, kdy není tranzistor zapnut)

$$P_{ZR} = R_{DS} \cdot I^2 = 2,9 \cdot 10^{-3} \cdot 3^2 = 26,1 \text{ mW} \quad (5.9)$$

Kde R_{DS} odpor přechodu drain – source
 I maximální průměrný proud tranzistorem

Ohřátí tranzistoru vinou ztrát

$$T = R_{\theta JA} \cdot P_Z = 125 \cdot 0,237 = 29,6 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.10)$$

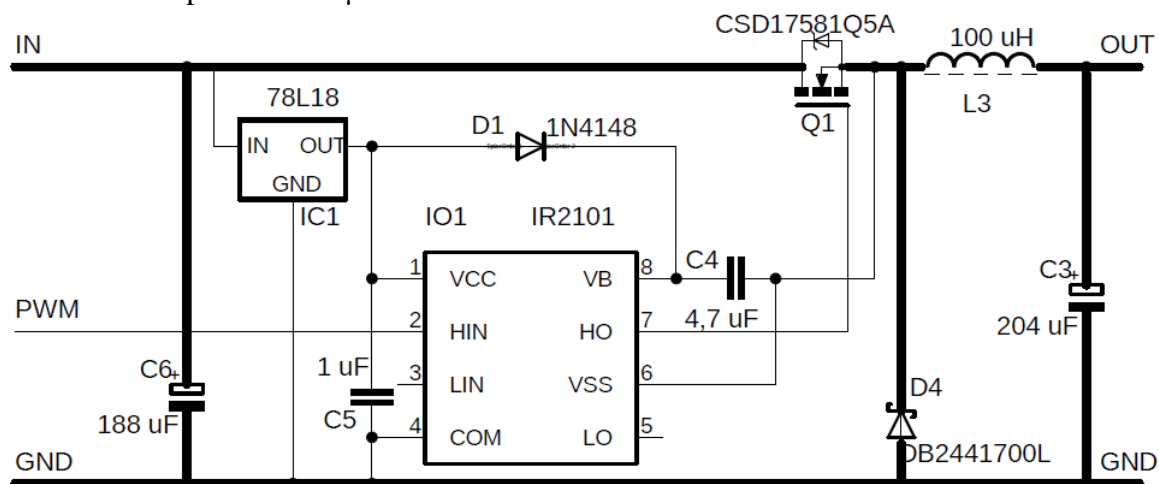
Kde $R_{\theta JA}$ tepelný odpor tranzistoru vůči prostředí [21]
 P_Z celkový ztrátový výkon

Při vypočteném ztrátovém výkonu, který je celkem 237 mW, se zahřeje tranzistor maximálně o 29,6 °C. Ohřátí tranzistoru je malé a není tedy nutné dodatečné chlazení. V obvodu je dále nutná nulovací dioda, přes kterou teče proud při vypnutém tranzistoru. Požadavkem na diodu je, aby byla rychlá, závěrné napětí bylo minimálně 26 V a byla dimenzována na proud 3,75 A (součet výstupního proudu zdroje a poloviny rozkmitu proudu na cívce). Podle požadavků je vybrána schottkyho dioda DB2441700L [22].

Parametry diody [22]:

- Závěrné napětí: 40 V
- Maximální propustný proud: 5 A
- Doba obnovy: 30 ns

Na Obrázek 5.9 je výsledné schéma nabíjecího obvodu. Pro připojení k akumulátorům bylo uvažováno použití relé, aby nedocházelo k vybíjení akumulátorů. Kvůli velikosti relé je zvoleno použití diody DPG10I200PA, která má zpětný proud maximálně $1 \mu\text{A}$ [23], což je zanedbatelné. Na vstup obvodu jsou ještě přidány kondenzátory s celkovou kapacitou $188 \mu\text{F}$.



Obrázek 5.9 Schéma výsledného zapojení měniče

5.4 Měření teploty

Pro měření teploty akumulátorů je vybrán termistor NTC 103AT-2. (Kapitola obsahuje informace z katalogového listu [24].) Odpor termistoru je 10 kΩ při 25 °C a s tolerancí ±1 %. Konstanta B je 3435 K s tolerancí ±1 %. Maximální chyba měření v závislosti na teplotě je vynesena v grafu na Obrázek 5.10.

Termistor je připojen k obvodu BQ76920, ze kterého je napájen přes vnitřní 10kΩ pull-up rezistor napětím 3,3 V. Měření termistoru je prováděno jednou za dvě sekundy 14bitovým ADC převodníkem a je následně zpřístupněno přes I2C.

Výpočet napětí ze změřené hodnoty [13]:

$$U_{TSX} = \text{hodnota ADC} \cdot 382 \mu V \quad [V] \quad (5.11)$$

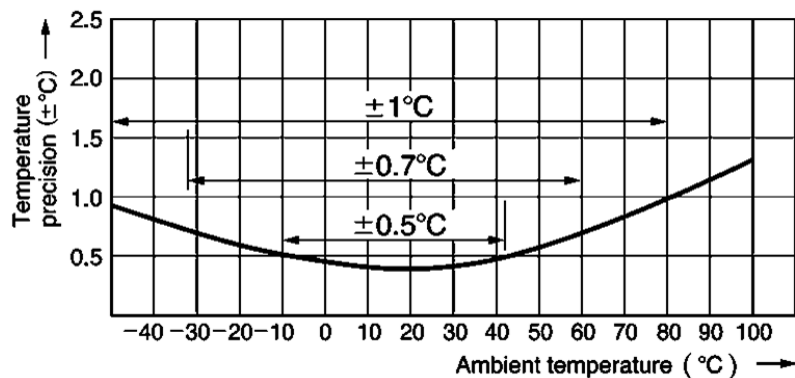
Výpočet odporu termistoru [13]:

$$R_{TS} = \frac{10000 \cdot U_{TSX}}{3,3 - U_{TSX}} \quad [\Omega] \quad (5.12)$$

Výpočet teploty:

$$t = \frac{1}{\frac{1}{t_{25} + 273,15} + \frac{1}{B} \ln\left(\frac{R_{TS}}{R_{25}}\right)} - 273,15 \quad [^{\circ}C] \quad (5.13)$$

Kde t_{25} teplota 25 °C
 R_{25} odpor při 25 °C



Obrázek 5.10 Závislost chyby měření na teplotě [24]

5.5 Měření vstupního napětí

Vstupní napětí je nutné měřit k informování programu, zda je připojen adaptér, ze kterého může začít nabíjení baterie. Druhým důvodem měření je zamezení pokusu o nabíjení vyšším proudem (chybě regulace), než je schopen dodat připojený zdroj. Měření je prováděno přes odporový dělič, který upravuje vstupní napětí na měřitelné napětí ADC převodníkem mikrokontroleru. Jelikož je dělič připojen na zem mikrokontroleru, je nutné kompenzovat úbytek napětí na tranzistorech mezi zemí mikrokontroleru a zemí napájecího adaptéru, úbytek napětí na bočníku je zanedbatelný.

Kvůli zvolenému zapojení, kdy proud procházející děličem prochází i přes bočník, by měl být zvolen co nejnížší proud. Proud děličem je zvolen 100 μA při 24 V a maximální měřitelné napětí je 30 V. Ze zvolených parametrů vychází celkový odpor děliče (rovnice 5.14). U analogového vstupu je maximální měřitelné napětí 2,50 V [14].

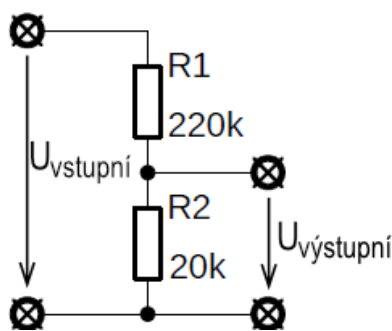
$$R = \frac{U_{vstupni}}{I_{dělíčem}} = \frac{24}{10^{-4}} = 240 \text{ k}\Omega \quad (5.14)$$

Rezistor R2:

$$R2 = \frac{U_{ADC_max} \cdot R}{U_{vstupni_max}} = \frac{2,5 \cdot 240 \cdot 10^3}{30} = 20 \text{ k}\Omega \quad (5.15)$$

Rezistor R1:

$$R1 = R - R2 = 240 \cdot 10^3 - 20 \cdot 10^3 = 220 \text{ k}\Omega \quad (5.16)$$



Obrázek 5.11 Dělič napětí na vstupu

Pro analogový vstup je tento odpor dle dokumentace [14] příliš vysoký. Je však možné dosáhnout akceptování i takto velkého odporu (viz kapitola 6.7). Dále je pro zlepšení měření k výstupu paralelně přidán 0,1 μF kondenzátor.

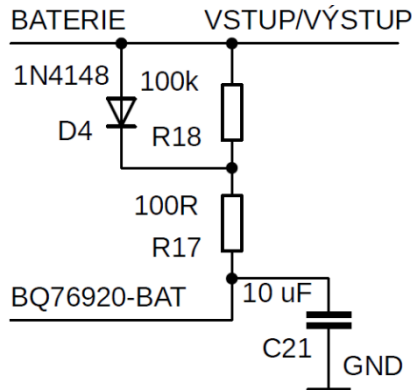
Výpočet maximálního a minimálního přijatelného napětí na analogovém vstupu při nabíjení:

$$U_{ADC_MAX} = U_{vstupni} * \frac{R2}{R1+R2} = 26 * \frac{2000}{22000+2000} = 2,17 \text{ V} \quad (5.17)$$

$$U_{ADC_MIN} = U_{vstupni} * \frac{R2}{R1+R2} = 22 * \frac{2000}{22000+2000} = 1,83 \text{ V} \quad (5.18)$$

5.6 BQ76920 – periferní obvody

Návrh periferních obvodů je proveden podle manuálu výrobce [13], doporučeních výrobce [25] a podle hotového zapojení nalezeného rovněž na stánkách výrobce [26]. Pro spuštění je k obvodu připojeno přes 10k Ω rezistor tlačítko pro zapnutí. Napájení obvodu je připojeno paralelním spojením diody 1N4148 a 100k Ω rezistoru a dále 100 Ω rezistorem připojeným k napájení obvodu (viz obrázek 5.12). K napájecímu pinu je připojen kondenzátor o hodnotě 10 μF . Toto zapojení zajistí, že pokud dojde k náhlému poklesu napětí v obvodu způsobeným například zkratem, nedojde k vypnutí obvodu z důvodu nízkého napětí, ale umožní zareagovat na poruchový stav.



Obrázek 5.12 Napájení obvodu BQ76920 [25]

Akumulátory jsou k obvodu připojeny přes rezistory o hodnotě 43 Ω , což umožňuje balancování proudem maximálně 50 mA (maximální proud pro balancování dle katalogového listu[13]) při napětí akumulátoru 4,3 V. Kvůli měření napětí akumulátoru probíhá balancování jen 70 % času. Zbytek času probíhá měření jeho napětí. Průměrný vybíjecí proud je tedy maximálně 35 mA, což znamená 1,4 % za hodinu u akumulátoru s kapacitou 2500 mAh (kapacita použitého akumulátoru pro testování). Rezistory musí být schopný rozptýlit výkon:

$$P = \frac{U_{Batt}}{2} \cdot I = \frac{4,3}{2} \cdot 35 \cdot 10^{-3} = 75,3 \text{ mW} \quad (5.19)$$

V případě že by byl balancovací proud nedostatečný, je možné přidat externí obvod s balancovacím tranzistorem. Pro měření proudu je vybrán 22m Ω rezistor s tolerancí 0,5 %, který dovolí měřit proud 9,09 A (rovnice 5.20), jelikož maximální měřitelné napětí obvodem je 200 mV.

$$I_{MAX} = \frac{U_{MAX}}{R} = \frac{200 \cdot 10^{-3}}{22 \cdot 10^{-3}} = 9,09 \text{ A} \quad (5.20)$$

Maximální napětí pro aktivaci nadproudové ochrany je 100 mV, maximální proud před aktivací této ochrany je tedy:

$$I_{OVC} = \frac{U_{max}}{R} = \frac{100 \cdot 10^{-3}}{22 \cdot 10^{-3}} = 4,55 \text{ A} \quad (5.21)$$

$$P_Z = R \cdot I = 0,022 \cdot 4,55 = 0,1 \text{ W} \quad (5.22)$$

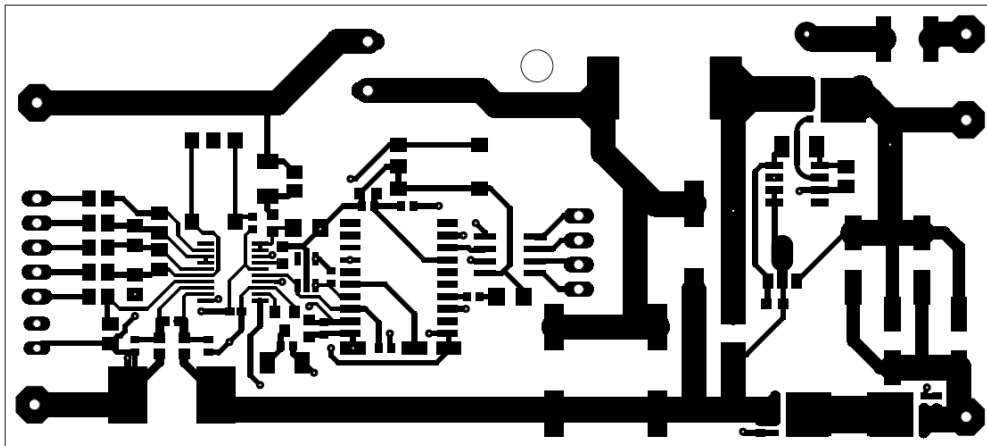
Ztrátový výkon na měřicím rezistoru je maximálně $P_Z = 0,1 \text{ W}$ (rovnice 5.22). V obvodu je použit rezistor se schopností rozptýlit 3 W. Rezistor je připojen k obvodu přes 100 Ω rezistory a k měřicím pinům jsou připojeny kondenzátory pro filtraci vysokých frekvencí, které by mohly zkreslovat měření.

Jako ochranné tranzistory pro nabíjení i vybíjení jsou použity stejné N-MOSFET tranzistory CSD17581Q5A jako u snižujícího měniče v zapojení dle doporučení výrobce.

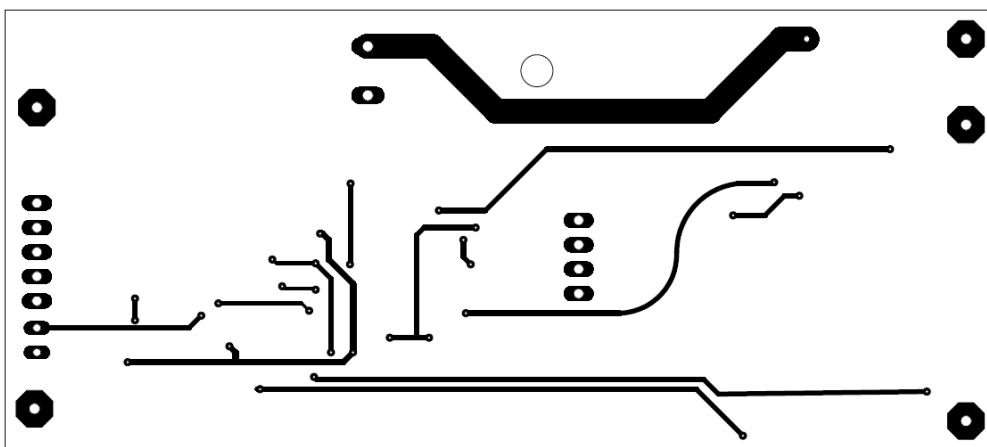
5.7 Návrh desky plošného spoje

Na levé straně DPS se nachází svorky pro připojení akumulátorů, pět svorek k jejich měření a termistor. U zemnicí svorky je umístěn bočník a v jeho těsné blízkosti se nachází obvod BQ76920, aby bylo splněno doporučení výrobce na co nejkratší vzdálenost mezi bočníkem a obvodem. Dále je směrem doprava od obvodu umístěn mikrokontroler ATTINY 1616, kvůli co nejmenší délce sběrnice I2C aby se zabránilo případnému rušení přenosu. Mezi těmito obvody je umístěna paměť EEPROM. V blízkosti mikrokontroleru je izolátor UART a jeho svorky. Směrem doprava se nachází obvod IR2101, který je umístěn v těsné blízkosti spínaného tranzistoru, aby spínací signál neovlivňoval jiné obvody na DPS. Co nejbližší spínaného tranzistoru je umístěna cívka a za ní tři kondenzátory typu Low-ESR pro snížení zvlnění výstupu měniče. Na pravé (vstupní) straně DPS jsou pak na záporném pólu umístěny dva tranzistory spínané obvodem BQ76920 a následně čtyři kondenzátory mezi kladným a záporným pólem pro připojení napájecího adaptéru. Na pravé straně jsou vyvedeny tři svorky, společná záporná svorka, kladná svorka pro napájecí adaptér a druhá kladná svorka pro vybíjení, chráněná 10A vratnou pojistkou. (celé zapojení viz schéma na obrázku 9.3 a 9.4)

Deska je navržena na základě vyrobeného prototypu.



Obrázek 5.13 Horní strana plošného spoje



Obrázek 5.14 Spodní strana plošného spoje

6 ŘÍDÍCÍ PROGRAM

Program mikrokontroleru je napsán v jazyce C, ve vývojovém prostředí Atmel Studio 7. Jazyk C je zvolen kvůli dostupným knihovnám v tomto jazyce a volně dostupnému překladači. Program je napsán tak, aby dokázal fungovat společně s aplikací v počítači, které na vyžádání posílá informace, nebo mění své parametry podle přijatých dat. Dokáže však také pracovat samostatně, kdy reaguje na připojení napájecího adaptéru, nebo zátěže. Pomocí jedné LED zobrazuje nejdůležitější informace a pro restartování ochran má jedno tlačítko.

Program se skládá z části inicializace a nekonečné smyčky *while(1)*, ve které jsou podle priority vykonávány funkce programu na základě požadavků.

Při inicializaci je nastaveno rozhraní UART, sběrnice I2C a výstup PWM. Dále je nastaven ADC převodník, RTC, vstupní pin s přerušením pro alarmový signál z BQ76920, vstupní pin pro tlačítko a výstupní pro LED. Následuje vyčtení uložených inicializačních hodnot z paměti EEPROM, inicializace obvodu BQ76920 a určení stavu nabití baterie podle změřeného napětí.

Následuje nekonečná smyčka *while(1)*, ve které se nachází 2 režimy programu. První režim je aktivní, pokud se inteligentní baterie nenachází ve stavu nabíjení, ani vybíjení. V tomto režimu je nejvíce šetřena energie tím, že většinu času je mikrokontroler ve stavu *STANDBY*, kdy je pozastaveno vykonávání programu a jsou vypnuty základní hodiny a některé periferie. V tomto stavu spotřebovává typicky 0,71 μA . Ze stavu *STANDBY* je probuzen jednou za 512 ms a probuzen zůstane ~2 ms, kdy má spotřebu 1,8 mA (pro 5 MHz – nejbližší hodnota z tabulky v dokumentaci [14]). Spotřeba v tomto režimu tedy je:

$$I = \frac{T_{\text{STANDBY}} \cdot I_{\text{STANDBY}} + T_{\text{ACTIVE}} \cdot I_{\text{ACTIVE}}}{T_{\text{cyklu}}} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,8 \cdot 10^{-3} + 510 \cdot 10^{-3} \cdot 0,71 \cdot 10^{-6}}{512 \cdot 10^{-3}} = 0,77 \mu\text{A} \quad (6.1)$$

Kde	T_{STANDBY}	doba strávená ve stavu <i>STANDBY</i>
	I_{STANDBY}	spotřebovávaný proud ve stavu <i>STANDBY</i>
	T_{ACTIVE}	doba strávená v aktivním stavu
	I_{ACTIVE}	spotřebovávaný proud v aktivním stavu
	T_{CYKLU}	celková doba cyklu

Kromě časovače může být také probuzen rozhraním UART, nebo časovačem pro uložení dat do EEPROM. Při probuzení je zkontrolováno, zda není připojena zátěž na výstup inteligentní baterie (vyčtením informace z obvodu BQ76920), dále je zkontrolováno, zda není připojen nabíjecí adaptér změřením vstupního napětí a na základě priority je jednou za 5 s vyčteno napětí a teplota akumulátorů. V případě požadavku jsou zpracována data z UART, případně uložena data do EEPROM.

Obsluha požadavků probíhá na základě příznaků prioritně (1 – nejvyšší priorita):

- 1) Přečtení dat z obvodu BQ76920
- 2) Kontrola zda nemá být spuštěno nabíjení, nebo vybíjení
- 3) Uložení krátké historie do EEPROM
- 4) Uložení dlouhé historie do EEPROM
- 5) Zpracování dat UART

Obvod BQ76920 má v tomto režimu vypnuté tranzistory pro nabíjení i vybíjení. Dále má vypnuto měření proudu a balancování, zapnuté zůstává jen měření napětí a teploty. V tomto stavu obvod spotřebovává 60 μ A [13].

Druhý režim je aktivní, pokud je baterie nabíjena, nebo vybíjena. V tomto režimu při nečinnosti přechází mikrokontroler do stavu *IDLE*, ve kterém spotřebovává 0,9 mA [14]. V tomto režimu jsou aktivní všechny aktivované periferie i základní hodiny. Z režimu spánku může být probuzen signálem na pinu z obvodu BQ76920, rozhraním UART, časovačem pro uložení do EEPROM a časovačem s periodou 512 ms, který slouží také jako watchdog řízení nabíjení.

Ve smyčce jsou volány funkce na základě příznakových bitů. Funkce jsou seřazeny prioritně, aby bylo zajištěno co nejrychlejší obslužení důležitých funkcí.

Obsluha požadavků probíhá na základě příznaků prioritně (1 – nejvyšší priorita):

- 1) Přečtení dat z obvodu BQ76920
- 2) Úprava střídy PWM pro nabíjení
- 3) Měření vstupního napětí
- 4) Úprava balancování
- 5) Uložení krátké historie do EEPROM
- 6) Uložení dlouhé historie do EEPROM
- 7) Zpracování dat UART

Pokud jsou všechny příznaky obslouženy, přechází mikrokontroler do režimu spánku. Zpět do prvního režimu se program při nabíjení dostane, pokud je odpojen napájecí adaptér, nebo pokud při vybíjení klesne vybíjecí proud na ~ 0 mA.

6.1 Nastavení RTC

Mikrokontroler obsahuje čítač reálného času, který funguje s vlastním oscilátorem o frekvenci 32 kHz s nízkou spotřebou. To mikrokontroleru dovoluje probouzet se z režimu spánku v nastaveném čase, i když má vlastní oscilátor s frekvencí 20 MHz vypnutý. Čítač má funkci čítače reálného času (RTC), který je použit pro ukládání krátké historie a periodický časovač přerušení (PIT), který je použit pro probouzení mikrokontroleru 1x za 512 s. Počítáním přerušení od PIT je také odvozeno 24 h pro uložení dlouhé historie. V registru CTRLA je RTC zapnut a povolen běh i v režimu spánku, dále je nastavena jeho dělička frekvence na hodnotu 2048. V registru CLKSEL

jsou zvoleny hodiny z 32kHz oscilátoru s nízkou spotřebou a v registru INTCTRL povoleno přerušení. Perioda přerušení je nastavena v registru PER podle vzorce 6.2:

$$PER = per_{minut} \cdot (CLK/PRESC) \cdot 60 \quad (6.2)$$

Kde per_{minut} perioda v minutách
 CLK frekvence oscilátoru
 $PRESC$ hodnota děliče frekvence

Dále je v registru PITCTRLA zapnut periodický časovač a nastavena jeho dělička frekvence na hodnotu 16384. V registru PITINTCTRL je povoleno jeho přerušení. Výpočet periody přerušení, viz rovnice 6.3:

$$T = \frac{PIT_PRESC}{CLK} = \frac{16384}{32 \cdot 10^3} = 512 \text{ ms} \quad (6.3)$$

Kde PIT_PRESC hodnota děliče frekvence periodického časovače

Před změnou parametrů RTC je nutné ověřit pomocí registru STATUS, že jsou všechny registry synchronizovány. (Kapitola obsahuje informace z katalogového listu [14].)

6.2 Nastavení UART a I2C

Sériové rozhraní UART je nastaveno na pinech PB3 (RXD) a PB2 (TXD). Rozhraní má vlastní generátor hodin odvozený od hodin jádra. Maximální frekvence UART je 1/8 frekvence jádra. V rovnici 6.4 je výpočet hodnoty registru BAUD, kde S je počet vzorků na jeden bit. Ve standardním modu je hodnota $S = 16$. Frekvence UART je zvolena $f_{BAUD} = 9600$ baud.

$$BAUD = \frac{64 \cdot f_{CLK}}{S \cdot f_{BAUD}} = \frac{64 \cdot 3333333,33}{16 \cdot 9600} \quad (6.4)$$

V registru CTRLC je nastaven asynchronní mód, délka dat 8 bitů, ODD parita a jeden stop bit. V registru CTRLB je povolen příjem i odesílání dat a přerušení od začátku příjmu dat. V registru CTRLA je povoleno přerušení od dokončení příjmu dat. Pro odesílání i příjem je vytvořen buffer o velikosti 64 bytů.

Sériová sběrnice I2C (TWI) je nastavena na pinech PA1 (SDA) a PA2 (SCL). Stejně jako UART má i tato sběrnice vlastní generátor hodin. Dokáže pracovat na frekvencích 100 kHz, 400 kHz a 1 MHz. Jelikož obvod BQ76920 podporuje jen frekvenci 100 kHz, je nutné použít právě tuto frekvenci. Tato rychlost je zvolena nastavením registru MBAUD na hodnotu dle rovnice (6.5).

$$MBAUD = \frac{f_{CLK}}{2 \cdot f_{SCL}} - 5 - \frac{f_{CLK} \cdot T_{RISE}}{2} = \frac{3333333,33}{2 \cdot 100000} - 5 - \frac{3333333,33 \cdot 0}{2} \quad (6.5)$$

V registru MCTRLA je sběrnice nastavena jako master, je povoleno přerušení a sběrnice je zapnuta. (Kapitola obsahuje informace z katalogového listu [14].)

6.3 Parametrizace a čtení z obvodu BQ76920

Parametrizace obvodu probíhá přes sběrnici I2C s frekvencí 100 kHz. Obvod BQ76920 je při komunikaci SLAVE, adresy registrů jsou 8bitové a při přenosu není použita ochrana pomocí CRC. Níže jsou vypsány používané registry v programu. (Zpracováno podle katalogového listu [13].)

6.3.1 Parametrizace

- Registr 0x04 (SYS_CTRL1)
 - Bit 3 (TEMP_SEL): „1“ pro nastavení měření externím termistorem
 - Bit 4 (ADC_EN): Povolení ADC převodníku pro měření napětí a teploty (podmínka pro funkci ochrany proti přepětí/podpětí)
- Registr 0x05 (SYS_CTRL2)
 - Bit 0 (CHG_ON): Zapnutí FET tranzistoru pro nabíjení
 - Bit 1 (DSG_ON): Zapnutí FET tranzistoru pro vybíjení
 - Bit 6 (CC_EN): Spuštění kontinuálního měření proudu
- Registr 0x06 (PROTECT1)
 - Bit 0-2 (SCD_T): Nastavení zkratového proudu ochrany
 - Bit 3-4 (SCD_D): Nastavení zpoždění vybavení ochrany proti zkratu (nastaveno 100 μ s)
- Registr 0x07 (PROTECT2)
 - Bit 0-3 (OCD_T): Nastavení nadproudové ochrany
 - Bit 4-6 (OCD_D): Nastavení zpoždění vybavení ochrany proti nadproudu (nastaveno 20 ms)
- Registr 0x08 (PROTECT3)
 - Bit 4-5 (OV_D): Nastavení zpoždění vybavení ochrany proti nízkému napětí (nastaveno 8 s)
 - Bit 6-7 (OV_D): Nastavení zpoždění vybavení ochrany proti vysokému napětí (nastaveno 1 s)
- Registr 0x09 (OV_TRIP)
 - Bit 0-7 (OV_T): Nastavení hodnoty přepětí pro vybavení ochrany
- Registr 0x0A (UV_TRIP)
 - Bit 0-7 (UV_T): Nastavení hodnoty podpětí pro vybavení ochrany
- Registr 0x0B (CC_CFG)
 - Bit 0-5 (CC_CFG): Po startu musí být registr nastaven na hodnotu 0x19

6.3.2 Čtení

Pro vyčítání dat z obvodu BQ76920 je velmi důležitý signál na pinu „alarm“ (PA3), který oznamuje událost na obvodu pro správu akumulátorů. Po obdržení signálu na tomto pinu je nutné vyčíst registr SYS_STAT, ve kterém je označena „1“ událost, která alarm vyvolala.

- Registr 0x00 (SYS_STAT)
 - Bit 0 (OCD): Zjištěn nadproud
 - Bit 1 (SCD): Zjištěn zkrat
 - Bit 2 (OV): Zjištěno přepětí
 - Bit 3 (UV): Zjištěno podpětí
 - Bit 5 (DEVICE_XREADY): Interní chyba čipu
 - Bit 7 (CC_READY): Dostupná nová data z měření proudu

Zpracování registru je nutné potvrdit zapsáním „1“ na příslušný bit.

Před vyčtením změřených dat je nutné mít uloženo kalibrační hodnoty. Ty lze přečíst z mikrokontroleru v příslušných registrech.

- Registr 0x50 (ADCGAIN1)
 - Bit 2-3 (ADCGAIN): Bity 3–4 hodnoty zesílení ADC převodníku [μV]
- Registr 0x59 (ADCGAIN2)
 - Bit 5-7 (ADCGAIN): Bity 0–2 hodnoty zesílení ADC převodníku [μV]
- Registr 0x51 (ADCOFFSET)
 - Bit 0-7 (ADCOFFSET): Offset změřené hodnoty napětí [mV]
- Registr 0x0C-0x15 (VCX_HI & VCX_LO)
 - Bit 0-7 (BATT_LO): Spodních 8 bitů změřené hodnoty napětí
 - Bit 8-13 (BATT_HI): Horních 6 bitů změřené hodnoty napětí
- Registr 0x32 (CC_HI) & 0x33 (CC_LO)
 - Bit 0-7 (CC_LO): Spodních 8 bitů změřené hodnoty proudu
 - Bit 8-15 (CC_HI): Horních 8 bitů změřené hodnoty proudu
- Registr 0x2C (TS1_HI) & 0x2D (TS1_LO)
 - Bit 0-7 (TS1_LO): Spodních 8 bitů změřené hodnoty teploty
 - Bit 8-15 (TS1_HI): Horních 6 bitů změřené hodnoty teploty

Výpočet hodnoty proudu z vyčtené hodnoty U_{CC} (reg. CC_HI & CC_LO):

$$I = \frac{(int16)U_{CC} \cdot 8,44 \cdot 10^{-6}}{R} = \frac{(int16)U_{CC} \cdot 8,44 \cdot 10^{-6}}{22 \cdot 10^{-3}} \quad [\text{A}] \quad (6.6)$$

Kde R odpor bočníku

Výpočet hodnoty napětí z vyčtené hodnoty VC_x (reg. VCX_HI & VCX_LO):

$$U = (365 + (uint8)ADCGAIN) \cdot 10^{-6} \cdot VC_x + ADCOFFSET \cdot 10^{-3} \quad [\text{V}] \quad (6.7)$$

Výpočet změřené teploty z vyčtené hodnoty:

Viz kapitola 5.4.

6.4 Přenos dat

Pro přenos dat je vytvořena struktura paketu, kterou jsou data přenášena v binární podobě. Komunikace probíhá na principu příkaz – odpověď.

0xFE	CRC délky	Délka paketu	Typ přenosu	Typ dat	Data	Číslo paketu (nepovinný)	CRC paketu
8 bitů	2 bitů	6 bitů	2 bitů	6 bitů	0-59 bytů	8 bitů	8 bitů

Tabulka 6.1 Struktura paketu

- 0xFE – start bit zajišťující synchronizaci (nesmí se vyskytovat jinde v přenosu)
- CRC délky – kontrola správnosti délky z důvodu, že není použit stop byt
- Délka paketu – počet odesílaných bytů paketu za 0xFE
- Typ přenosu – označuje druh paketu
 - Zápis dat
 - Čtení dat
- Typ dat – označení požadovaných dat k zápisu/čtení
- Data pro zápis/čtená data, délky 0-59 bytů (delší data je nutné odeslat více pakety)
- Číslo paketu – pokud jsou data odesílána ve více paketech, jsou pakety číslovány
- CRC paketu – kontrolní součin (typ přenosu, typ dat, data a číslo paketu) XOR bytů

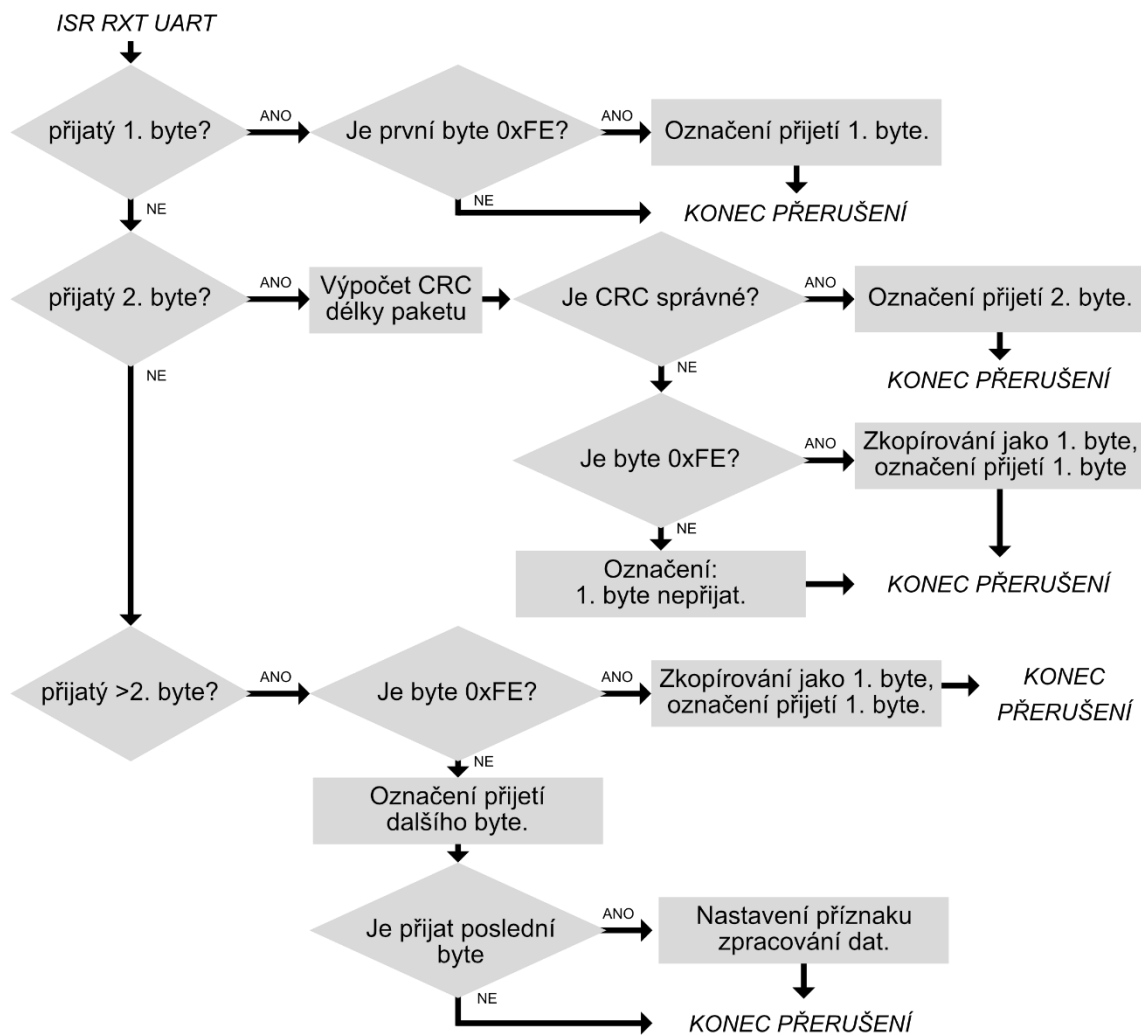
Jelikož se v přenosu nesmí vyskytovat byt 0xFE a je nutné zajistit přenos tohoto bytu, je při odeslání nahrazen dvěma byty.

Byt k nahrazení	Náhrada
0xFE	0xFF + 0x01
0xFF	0xFF + 0x02

Tabulka 6.2 Náhrada zakázaných bytů

Každý paket musí být od inteligentní baterie potvrzen odesláním požadovaných dat, nebo odesláním potvrzení, které má stejné číslo typu přenosu i dat.

Program inteligentní baterie v přerušení kontroluje, zda je na prvním místě paketu byt 0xFE a zda je u bytu s délkou dat správné CRC. Pokud narazí na chybu, čeká znovu na byt 0xFE (viz Obrázek 6.1). Po přijetí celého paketu nastaví příznakový bit pro zpracování paketu. Na základě příznakového bitu je v hlavní smyčce zavolána funkce pro zpracování paketu.



Obrázek 6.1 Vývojový diagram obsluhy přerušení RXT UART

Funkce zpracovávající paket zkontroluje kontrolní součet a doplní byt 0xFE a 0xFF na místa jejich náhrad. Na základě bytu s číslem typu přenosu a typu dat zpracuje data a vytvoří odpověď s požadovanými daty. Data jsou předány funkci, která doplní oba kontrolní součty a paket odešle. (Více o typech přenosu a dat v kapitole 7.1.)

6.5 Ukládání dat do EEPROM

EEPROM paměť je pro ukládání rozdělena do tří částí. První část je pevně dané velikosti a ukládají se zde informace o baterii a nastavení obvodů (viz Tabulka 6.3). Druhá a třetí část je vyčleněna pro logované informace a je navržena, aby uložená data zabírala co nejméně bitů. V druhé části je ukládána krátká historie, která se ukládá jednou za 6 s až hodinu (viz Tabulka 6.4). Třetí část je vyhrazena pro ukládání dlouhé historie, která je ukládána jednou za den (viz Tabulka 6.5).

6.5.1 První část

Název proměnné	Paměťová náročnost	Rozsah
Celková kapacita baterie – aktuální	16 bitů	0–65535 mAh
Celková kapacita baterie – původní	16 bitů	0–65535 mAh
Maximální napětí akumulátoru	16 bitů	0,000–4,300 V
Maximální napětí akumulátoru – ochrana	8 bitů	3,043–4,582 V
Minimální napětí akumulátoru – ochrana	8 bitů	1,496–3,034 V
Maximální proud akumulátoru – nabíjení	16 bitů	0,000–3,000 A
Ukončovací proud akumulátoru – nabíjení	16 bitů	0,01 A–nab. proud
Maximální proud akumulátoru – ochrana	8 bitů	0,77–4,55 A
Zkratový proud – ochrana	8 bitů	2,00–9,09 A
Maximální teplota pro nabíjení	8 bitů	-127–127 °C
Minimální teplota pro nabíjení	8 bitů	-127–127 °C
Maximální teplota pro vybíjení	8 bitů	-127–127 °C
Minimální teplota pro vybíjení	8 bitů	-127–127 °C
Interval ukládání krátké historie	16 bitů	6 s–1 h
Počet cyklů baterie	16 bitů	0–6553,5
Počet vybití pod 50 %	16 bitů	0–65535
Počet vybití pod 20 %	16 bitů	0–65535
Počet vybití pod 10 %	16 bitů	0–65535
Počet vybití na 0 %	16 bitů	0–65535

Tabulka 6.3 Struktura dat v první části

6.5.2 Druhá část

Název proměnné	Paměťová náročnost	Rozsah hodnot
Aktuální proud – průměrný	10 bitů	-5,00–5,00 A
Aktuální proud – maximální	10 bitů	-5,00–5,00 A
Aktuální napětí – celkové	9 bitů	0,0–17,2 V
Aktivovaná ochrana baterie	3 bity	-

Tabulka 6.4 Struktura dat ve druhé části

Ukládané aktivované ochrany jsou tři:

- nadproud/zkrat (0x01)
- podpětí/přepětí (0x02)
- teplota vysoká/nízká (0x04)

6.5.3 Třetí část

Název proměnné	Paměťová náročnost	Rozsah hodnot
Maximální proud – vybíjecí	9 bitů	0,00–5,00 A
Aktivovaná ochrana baterie	7 bitů	-
Maximální teplota	8 bitů	-127–127 °C
Minimální teplota	8 bitů	-127–127 °C
Spotřebováno energie	12 bitů	0–40,95 * kapacita
Dobito energie	12 bitů	0–40,95 * kapacita

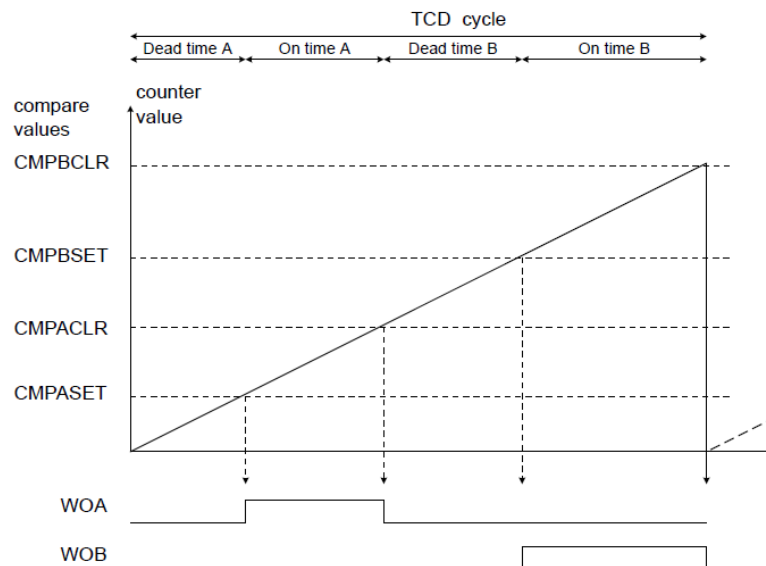
Tabulka 6.5 Struktura dat ve třetí části

Ukládaných aktivovaných ochran je šest:

- nadproud (0x01)
- zkrat (0x02)
- přepětí (0x04)
- podpětí (0x08)
- nízká teplota (0x10)
- vysoká teplota (0x20)

6.6 Řízení PWM výstupu

PWM běží v módu „jedna rampa“. V tomto módu jsou možné dva výstupy se stejnou frekvencí, z něhož je využit jen výstup B vyvedený na pin PA5.



Obrázek 6.2 Funkce generování PWM signálu časovačem TCD [14]

Pro řízení PWM výstupu je napsán ovladač, který inicializuje registry časovače TCD.

- Registr 0x00 (CTRLA)
 - Bit 0 (ENABLE): 0x1 – zapnutí časovače
 - Bit 3–4 (CNTPRES): 0x0 – dělička hodin časovače (1x)

- Bit 5–6 (CLKSEL): 0x0 – interní oscilátor 20 MHz
- Registr 0x01 (CTRLB)
 - Bit 0–1 (WG MODE): 0x0 – mód jedné rampy
- Registr 0x2C – 0x2D (CMPBSET)
 - Bit 0–11 (CMPSET): Hodnota časovače pro zapnutí výstupu B
- Registr 0x2E = 0x2F (CMPBCLR)
 - Bit 0–11 (CMPCLR): Hodnota časovače pro vypnutí výstupu B a ukončení cyklu

Hodnoty registrů CMPBSET a CMPBCLR jsou synchronizovány vždy na konci cyklu. Funkce ovladače nastavující střidu výstupního signálu má vstupem hodnotu 0–1529 (střída 0–100 %), podle které nastavuje registry CMPBSET a CMPBCLR na příslušné hodnoty podle tabulky 5.2. (Kapitola obsahuje informace z katalogového listu [14].)

6.7 Nastavení ADC převodníku

Pro měření vstupního napětí je aktivován ADC převodník, který na vyžádání provede jedno měření a následně je vypnut pro úsporu energie. Integrovaný převodník má rozlišení 10 bitů a je optimalizován pro signály s výstupním odporem 10 kΩ, nebo menším. K měření má několik vnitřních referenčních napětí, je vybráno 2,5 V. Pro svou funkci potřebuje frekvenci 50 kHz až 1,5 MHz, kterou si vygeneruje vlastní děličkou kmitočtu z hodin pro periferie. Nejbližší nižší kmitočet, který je možný vygenerovat děličkou je:

$$f_{ADC} = \frac{f_{PER}}{PRESCALE} = \frac{3333333,3}{4} = 833,33 \text{ kHz} \quad (6.8)$$

Kde f_{PER} frekvence hodin pro periferii (i CPU)
 PRESCALE dělicí poměr (2^x)

Vstupní dělička má vyšší výstupní odpor, než je požadováno převodníkem, odpor je:

$$R_{vyst} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{220 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^3}{220 \cdot 10^3 + 20 \cdot 10^3} = 18,33 \text{ k}\Omega \quad (6.9)$$

Pro zachování přesnosti měření je nutné ověřit, zda je čas nabíjení vnitřního kondenzátoru ADC převodníku dostatečný. Výchozí čas jsou 2 cykly hodin, což je 2,4 μs při nastavené frekvenci. Násobek časové konstanty pro výrobcem doporučené parametry a minimální čas nabíjení vnitřního kondenzátoru je:

$$M = \frac{SAMP/f_{MAX}}{(R_d + R_{in}) \cdot C_{in}} = \frac{2/1,5 \cdot 10^6}{(10 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3) \cdot 5 \cdot 10^{-12}} = 13,33 \quad (6.10)$$

$$T = M \cdot (R_d + R_{in}) \cdot C_{in} = 13,33 \cdot (18,33 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3) \cdot 5 \cdot 10^{-12} = 1,89 \text{ }\mu\text{s} \quad (6.11)$$

Kde M násobek časové konstanty
 SAMP počet cyklů nabíjení kondenzátoru
 f_{MAX} maximální frekvence ADC převodníku

R_d	výstupní odpor děliče
R_{in}	vstupní odpor ADC převodníku
C_{in}	kapacita vnitřního kondenzátoru ADC převodníku
T	minimální čas nabíjení kondenzátoru

Dle výpočtu 6.10 a 6.11 není nutné prodlužovat čas nabíjení kondenzátoru, neboť čas je již dostatečně prodloužen sníženou frekvencí ADC převodníku oproti maximu.

Kvantizační krok ADC převodníku je:

$$q_U = \frac{U_{MAX}}{1023} = \frac{30}{1023} = 0,029 \text{ V} \quad (6.12)$$

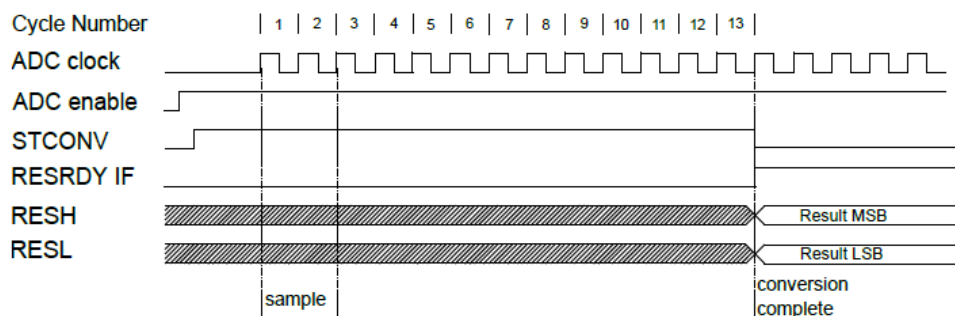
Výpočet výsledného napětí je:

$$U = \frac{U_{MAX} \cdot RES}{1023} \quad [\text{V}] \quad (6.13)$$

Kde RES hodnota obdržená z ADC převodníku

Doba převodu jednoho vzorku je:

$$T_{převodu} = \frac{1}{f_{PER}} \cdot \left(\frac{PRESCALE}{2} + 2 \right) + \left(\frac{SAMP+11}{f_{ADC}} \right) = \frac{1}{3,33 \cdot 10^6} \cdot \left(\frac{4}{2} + 2 \right) + \left(\frac{2+11}{833,33 \cdot 10^3} \right) = 16,8 \mu\text{s} \quad (6.14)$$



Obrázek 6.3 Časový diagram převodu jednoho vzorku [14]
(Kapitola obsahuje informace z katalogového listu [14].)

6.8 Stav nabití akumulátoru

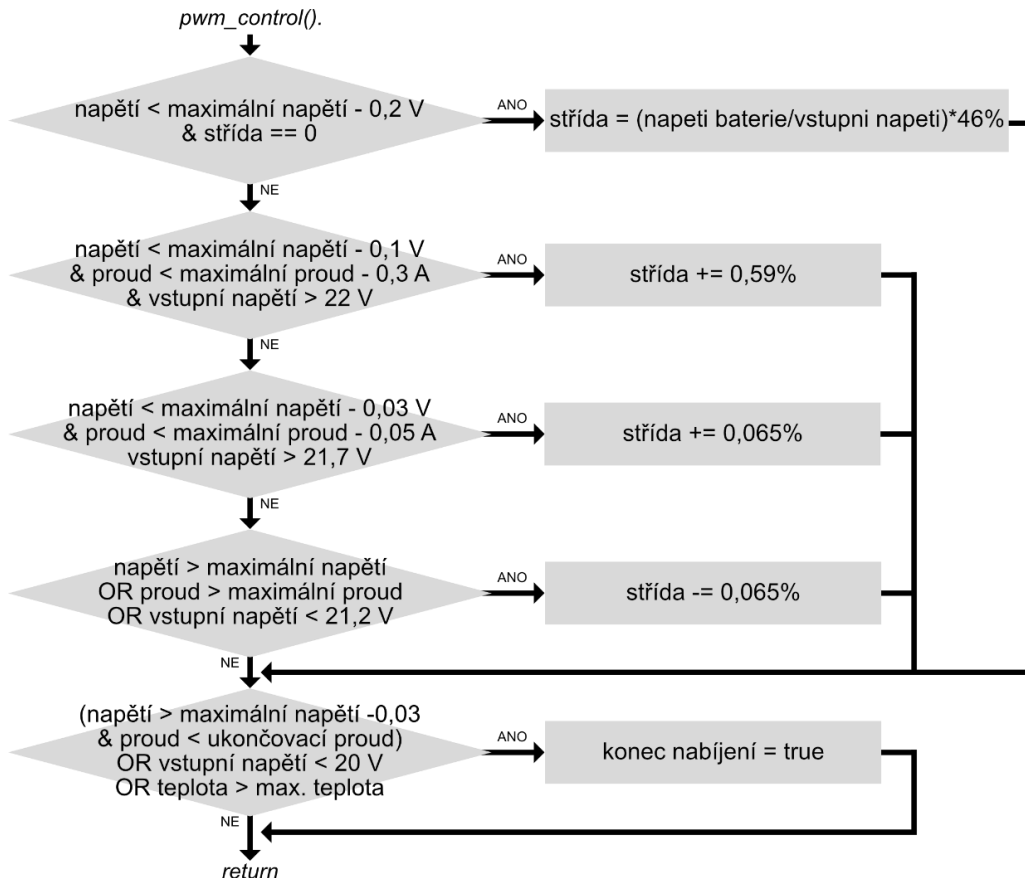
Měření stavu nabití akumulátoru je možné dvěma způsoby. Prvním z nich je měření podle aktuálního napětí akumulátoru, které je však závislé na jeho konstrukci, proto je tento způsob v programu použit jen jako orientační určení při prvním spuštění. Druhým způsobem je integrace proteklého proudu. Tento způsob je v programu použit tak, že každé vyčtené měření proudu je přičteno do proměnné. Číslo akumulované v této proměnné lze následně převést na Ah, jelikož víme, že nové měření probíhá 4krát za vteřinu. Zbývající energie je tedy:

$$C = \frac{(akumulovaná\ hodnota \cdot gain)}{4 \cdot 60 \cdot 60} \quad [\text{Ah}] \quad (6.15)$$

Stav nabití je vynulován, pokud dojde k odpojení zátěže z důvodu nízkého napětí akumulátoru, případně je stav nabití nastaven na 100 % při ukončení nabíjení. Celková kapacita akumulátoru je aktualizována jen pokud nabíjení začíná na 0 %.

6.9 Nabíjení

Spuštění nabíjení je zahájeno po naměření dostatečného napětí (>22 V) na vstupu pro napájecí adaptér. Následně je zapnuto měření proudu akumulátorů a otevřen ochranný tranzistor pro nabíjení, poté je pro každé druhé příchozí měření (1x za 500 ms) volána funkce řízení nabíjení *pwm_control()*.



Obrázek 6.4 Zjednodušený vývojový diagram nabíjení

Funkce provádí regulaci nabíjení na základě napětí, proudu i teploty akumulátoru (viz obrázek 6.4). Při prvním zavolání funkce je nastavena střída PWM na takovou hodnotu, kdy je zajištěno, že výstupní proud, ani napětí nepřekročí parametry akumulátoru. Dále je střída zvyšována o půl procenta při každém zavolání, až do dosažení o 0,1 V nižšího napětí, než je napětí maximální, nebo až do dosažení proudu, který je nižší o 0,3 A, než je maximální dobíjecí proud. Dále je řízen výstupní proud/napětí nejmenším krokem PWM signálu (0,065 %). Střída je také závislá na vstupním napětí, kdy se při jeho poklesu střída PWM již nezvyšuje, snižuje, nebo je nabíjení ukončeno. Dále je regulace závislá na teplotě, pokud je teplota mimo rozsah, není nabíjení zahájeno. V průběhu nabíjení je kontrolováno jen překročení maximální teploty, které zapříčiní ukončení nabíjení. Volání funkce regulující nabíjení je řízeno příchozími daty z externího obvodu (BQ76920), z tohoto důvodu je nastaven také watchdog, který ukončí nabíjení, pokud po dobu 1 s neprijdou z obvodu žádná nová měření.

V této funkci je také prováděno měření vnitřního odporu akumulátoru. Měření je provedeno jednou za nabíjení, ve fázi, kdy je na akumulátoru s odchylkou maximální proud i napětí. Měření probíhá tak, že je vypnuto balancování a na 1 s je ponechána střída nabíjecího zdroje na stejné hodnotě. Následně jsou uloženy změřené hodnoty napětí a proudu, poté je střída nabíjecího zdroje snížena o 5 % a po 1 s je z nově změřených a dříve uložených hodnot vypočítán vnitřní odpor akumulátorů.

$$R_{in} = \frac{U_{HI} - U_{LO}}{I_{HI} - I_{LO}} \quad [\Omega] \quad (6.16)$$

Kde R_{in} vnitřní odpor akumulátoru
 U_{HI} napětí při maximálním dobíjecím proudu
 U_{LO} napětí při sníženém nabíjecím proudu
 I_{HI} maximální dobíjecí proud
 I_{LO} snížený dobíjecí proud

Následně je střída zdroje vrácena na původní hodnotu a pokračuje se ve standardní regulaci nabíjení.

Při nabíjení je jednou za 10 s upraveno balancování akumulátorů. Balancování je spuštěno, pokud je rozdíl napětí akumulátorů větší než 0,5 %. V tomto případě je spuštěno balancování akumulátoru s nejvyšším napětím. Druhý akumulátor je balancován jen v případě, že akumulátor s druhým nejvyšším napětím nesousedí s balancovaným akumulátorem a má vyšší napětí, než je průměrné napětí akumulátorů.

6.10 Tlačítko a signalizační LED

Obvod s programem je navržen pro funkci s nadřazeným systémem, avšak dokáže fungovat i samostatně, z tohoto důvodu se na něm nachází tlačítko pro restartování aktivovaných ochranných (připojeno k pinu PC2) a LED (připojena k pinu PA6), která zprostředkovává základní informace:

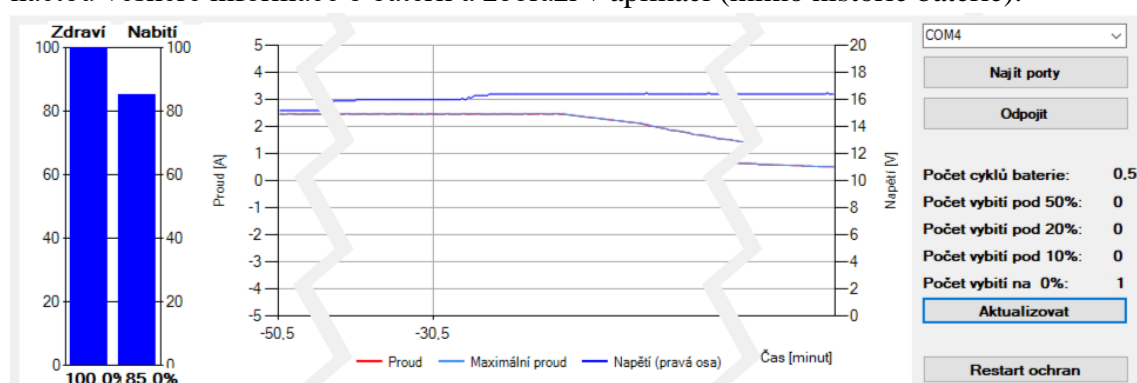
Doba svitu	Signalizovaná funkce
100 %	Aktivována ochrana (deaktivováno nabíjení/vybíjení)
50 %	Nabíjení
10 %	Vybíjení
0 %	Konec nabíjení, nebo spánek

Tabulka 6.6 Funkce LED

7 POČÍTAČOVÁ APLIKACE

Aplikace je napsána v jazyce C# prostřednictvím vývojového prostředí Microsoft Visual Studio. Hlavní výhodou použití je možnost snadného vývoje formulářových aplikací pro Windows. Aplikace komunikuje s inteligentní baterií přes UART a umožňuje uživateli sledovat důležité parametry akumulátorů, vyčítat historii a nastavovat její parametry. Pro lepší orientaci uživatele je program vizuálně rozčleněn do několika částí. (Vzhled celé aplikace: viz příloha – obrázek 9.5.)

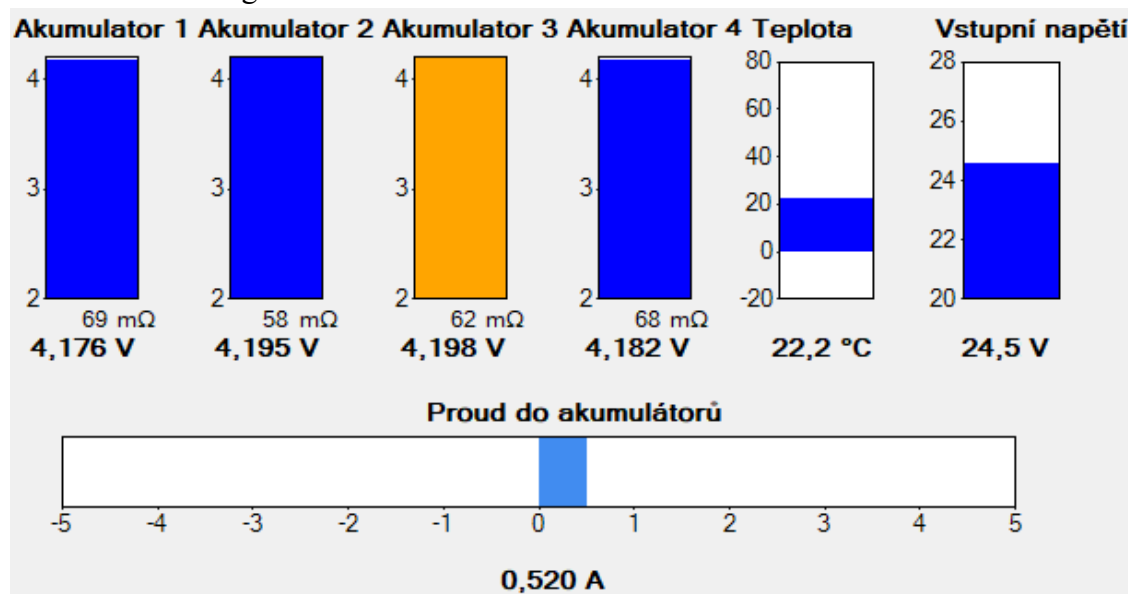
Nejprve je nutné aplikaci připojit k inteligentní baterii vybráním COM portu v pravém horním rohu (zde je i možné aplikaci od inteligentní baterie odpojit). Po připojení se načtou veškeré informace o baterii a zobrazí v aplikaci (mimo historie baterie).



Obrázek 7.1 Počítačová aplikace – horní část

Po připojení se vpravo nachází informace o počtu cyklů baterie a o počtu vybití pod stanovená procenta. Dále zde nalezneme informaci o aktivované ochraně (např. nadproud, přepětí) a možnost jejich restartování.

Vlevo nalezneme graf krátké historie a ukazatele stavu nabití a zdraví baterie.



Obrázek 7.2 Počítačová aplikace – grafické ukazatele

Pod grafem se nachází několik grafických ukazatelů doplněných o číselnou hodnotu. Zleva jsou zde zobrazeny 4 akumulátory, ukazatel je standardně modrý, při aktivním balancování akumulátoru změni barvu na oranžovou. Pod ukazatelem se nachází informace o vnitřním odporu, což může pomoci k odhalení konce životnosti akumulátoru, a číselná hodnota aktuálního napětí. Dále je zde ukazatel teploty akumulátorů a vstupního napětí při nabíjení. Níže se nachází ukazatel proudu (kladné hodnoty znamenají dobíjecí proud, záporné proud vybíjecí).

<input type="checkbox"/> Aktualizovat jednou za: <input type="text" value="1"/> s	Původní kapacita: <input type="text" value="2500"/> mAh <input type="button" value="Změnit"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Napětí akumul. <input checked="" type="checkbox"/> Proud <input checked="" type="checkbox"/> Teplota	Aktuální kapacita: 2500 mAh <input type="button" value="Aktualizovat"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Vstupní napětí <input checked="" type="checkbox"/> Kapacita <input checked="" type="checkbox"/> Ochrany	Stav nabití baterie: 2126 mAh
<input type="button" value="Aktualizovat nyní"/> <input type="checkbox"/> Ukládat do souboru	Vnitřní odpor akumul.: 64 mΩ <input type="button" value="Aktualizovat"/>
Krátká historie <input type="button" value="Vyčist"/> <input type="button" value="Uložit"/>	Maximální napětí akumul. (nabíjení): <input type="text" value="4,2"/> V
Dlouhá historie <input type="button" value="Vyčist"/> <input type="button" value="Uložit"/>	Maximální napětí akumul. (ochrana): <input type="text" value="4,202"/> V
Interval krátké historie <input type="text" value="0,1"/> min. <input type="button" value="Změnit"/>	Minimální napětí akumul. (ochrana): <input type="text" value="2,703"/> V
	<input type="button" value="Změnit"/>
Maximální teplota při nabíjení: <input type="text" value="45"/> °C	Maximální nabíjecí proud (nabíjení): <input type="text" value="2,6"/> A
Minimální teplota při nabíjení: <input type="text" value="0"/> °C	Ukončovací proud nabíjení: <input type="text" value="0,1"/> A
Maximální teplota při vybíjení: <input type="text" value="60"/> °C	Maximální vybíjecí proud (ochrana): <input type="text" value="2,55"/> A
Minimální teplota při vybíjení: <input type="text" value="-20"/> °C	Zkratový proud (ochrana): <input type="text" value="5,05"/> A
<input type="button" value="Změnit"/>	<input type="button" value="Změnit"/>

Obrázek 7.3 Počítačová aplikace – nastavení

Vpravo dole se nachází část s nastaveními. V této části, v prvním sloupci, nalezneme možnost nastavení aktualizace zvolených údajů v nastavené periodě. Dále je zde část, ve kterém můžeme nastavit ukládání (viz kapitola 7.2) a na spodní části můžeme nastavit teplotní limity. V druhém sloupci se nastavuje původní kapacita, níže se nachází korigovaná hodnota aktuální kapacity změřená inteligentní baterií a stav nabití baterie. Pod ní se nachází průměrný odpor akumulátorů. Dále je zde nastavení napětí, první maximální napětí, na které budou akumulátory dobíjeny a nastavení napětí ochranných obvodů, při kterých jsou akumulátory odpojeny. Dále je zde nastavení proudu, první maximální proud, kterým budou akumulátory nabíjeny, proud, při kterém bude nabíjení ukončeno a nastavení proudů pro ochranné obvody, při kterých budou akumulátory odpojeny (zkratová ochrana má rychlejší reakci oproti nadproudové ochraně). Pokud je nastavení změněno, příslušné tlačítko zčervená až do doby, než je změna úspěšně zapsána do inteligentní baterie.

7.1 Data v paketu

Jak je popsáno v kapitole 6.4, data jsou přenášena pomocí paketů. Níže jsou dvě tabulky s popisem dat, které může aplikace od baterie vyžádat, nebo je do baterie zapsat a číslo dat, které k tomu použije.

Číslo dat	Data
1	Aktuální napětí akumulátorů + informace o balancování
2	Aktuální proud do baterie
3	Aktuální teplota baterie
4	Vstupní napětí adaptéru pro nabíjení
5	Stav nabití
6	Stav baterie
7	Počet cyklů baterie
8	Počet vybití pod stanovená procenta
9	Odpor bočníku + zesílení a ofset měření napětí
10	Nastavení ochranných obvodů – napětí + limity pro nabíjení
11	Nastavení ochranných obvodů – proud + limity pro nabíjení
12	Nastavení teplotních limitů
13	Aktivované ochrany (podpětí, přepětí, nadproud...)
14	Vnitřní odpor akumulátorů + interval ukládání krátké historie
15	Vyčtení krátké historie (více paketů)
16	Vyčtení dlouhé historie (více paketů)

Tabulka 7.1 Možnosti přenosu dat přes UART – čtení (0)

Číslo dat	Data
1	Původní kapacita baterie
2	Nastavení ochranných obvodů – napětí + limity pro nabíjení
3	Nastavení ochranných obvodů – proud + limity pro nabíjení
4	Nastavení teplotních limitů
5	Interval ukládání krátké historie
6	Reset ochrany (podpětí, přepětí, nadproud...)

Tabulka 7.2 Možnosti přenosu dat přes UART – zápis (1)

7.2 Ukládání do souboru

Program je schopen ukládat do souboru tři různé typy logovaných dat. Při kliknutí na tlačítko pro uložení je uživatel vyzván k vybrání umístění, kam má být soubor uložen/ukládán. Soubor se ukládá s příponou CSV a je možné jej otevřít v tabulkovém procesoru (např. Excel). Všechny soubory mají záhlaví s popisem dat v daném sloupci. Logování aktuálně přichozích dat je možné aktivovat zatržítkem „Ukládat do souboru“ (viz Obrázek 7.4). Následně budou ukládána všechna přichozí data, která jsou zatržena.

Aktualizovat jednou za: s
 Napětí baterií Proud Teplota
 Vstupní napětí Kapacita Ochrany
 Ukládat do souboru

Obrázek 7.4 Nastavení aktualizace a ukládání dat

Napětí 1 [V]:	Napětí 2 [V]:	Napětí 3 [V]:	Napětí 4 [V]:	Proud [A]:	Teplota [°C]:	Vstupní napětí[V]:	Stav nabití baterie [mAh]:	Aktivované ochrany:
2,829	2,749	3,026	2,893	-1,501	34,44	0	52	0
2,826	2,747	3,015	2,897	-1,501	34,44	0	52	0
3,015	3,004	3,155	3,037	0	34,42	0	0	podpětí akumulátoru,8

Tabulka 7.3 Ukázka ukládaných dat v souboru CSV

Ukládání krátké a dlouhé historie je možné ve střední části, je však nutné historii první načíst z inteligentní baterie tlačítkem „vyčíst“. Během vyčítání je dané tlačítko červené, po úspěšném dokončení přenosu změni svou barvu zpět na šedou (krátká historie se mimoto po načtení zobrazí jako graf). U krátké historie lze také upravit interval jejího ukládání.

Krátká historie
Dlouhá historie
Interval krátké historie min.

Obrázek 7.5 Ukládání krátké a dlouhé historie

Čas [min]:	Napětí [V]:	Průměrný proud [A]:	Maximální proud [A]:	Aktivované ochrany:
-1	14,4	-2,12	-2,16	0
-2	14,4	-2,13	-2,15	0
-3	14,4	-2,11	-2,16	0

Tabulka 7.4 Ukázka ukládaných dat krátké historie v souboru CSV

Maximální vybíjecí proud [A]:	Aktivované ochrany:	Maximální teplota [°C]:	Minimální teplota [°C]:	Spotřebováno energie [mAh]:	Dobito energie [mAh]:
2,12	4	34	23	4750	5250
1,43	8	42	24	4250	3250
1,52	0	38	21	7250	7000

Tabulka 7.5 Ukázka ukládaných dat dlouhé historie v souboru CSV

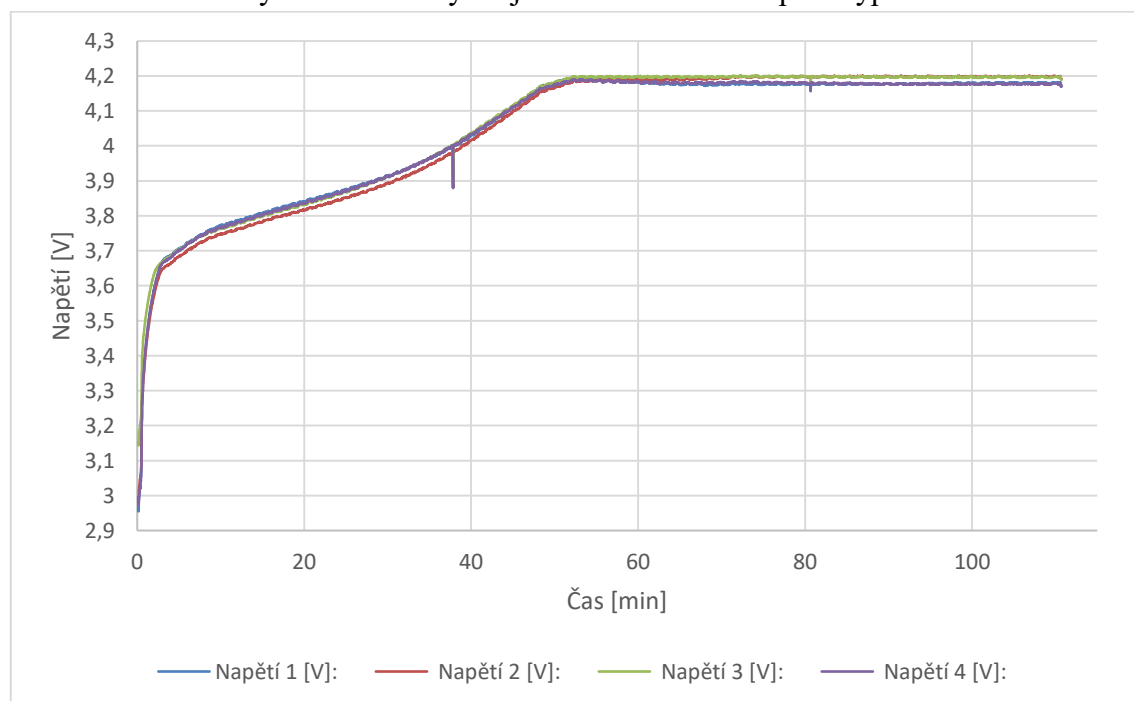
8 TESTOVÁNÍ INTELIGENTNÍ BATERIE

Dokončený prototyp inteligentní baterie byl otestován společně se čtyřmi Li-ion akumulátory Nexell LIR18650 3,6 V 2500 mAh.

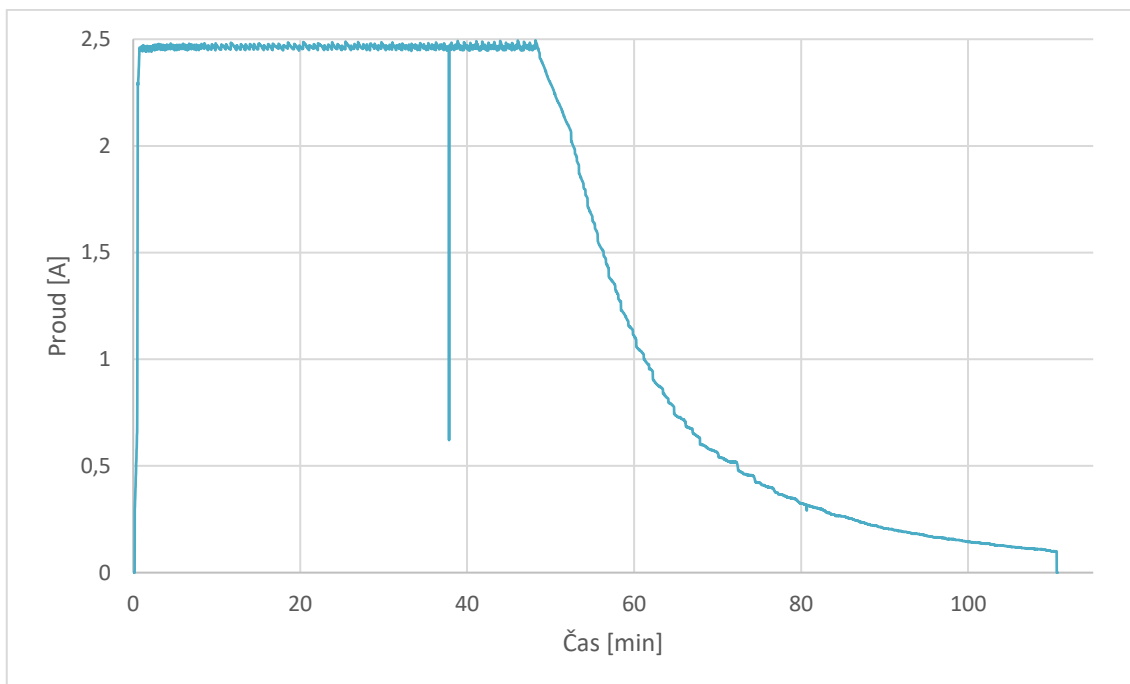
Kapacita	2500 mAh
Nominální napětí	3,6 V
Minimální napětí	2,75 V
Maximální napětí	4,20±0,03 V
Maximální nabíjecí a vybíjecí proud	2,5 A
Vnitřní odpor	≤60 mΩ
Rozsah teplot pro nabíjení	0–45 °C
Rozsah teplot pro vybíjení	-20–60 °C

Tabulka 8.1 Parametry akumulátoru pro testování [27]

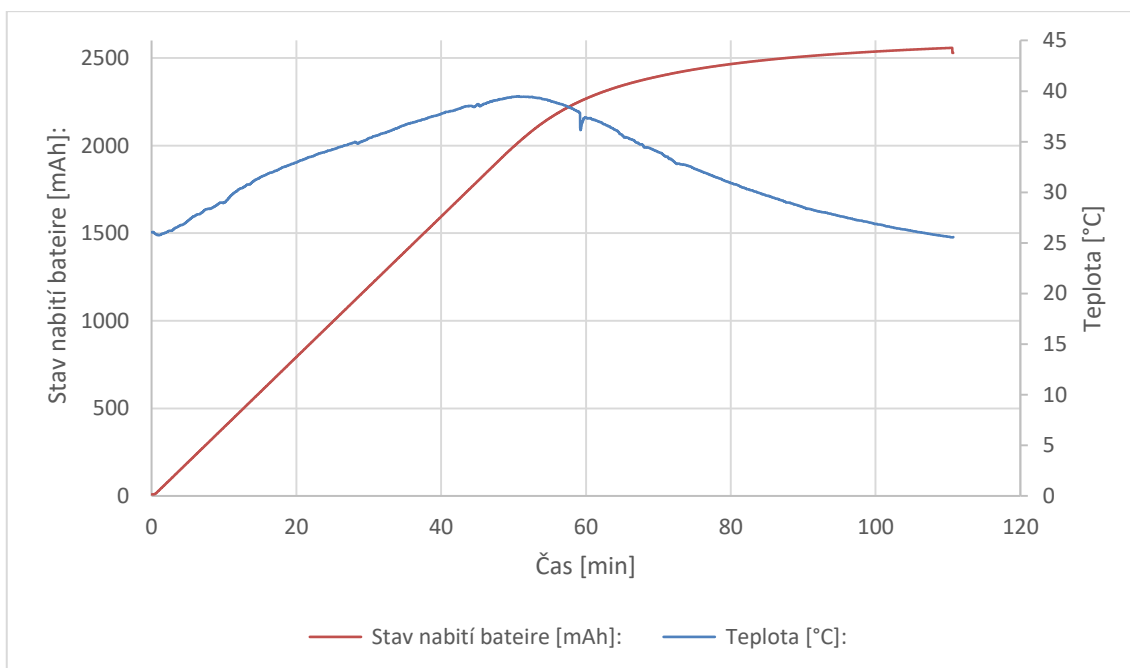
Při testování byl teplotní senzor připevněn k jednomu z akumulátorů. Jako napájecí adaptér byl použit stabilizovaný zdroj s nastaveným napětím ~24 V a proudovým omezením nastaveným na 3 A (proudové omezení zdroje nebylo v průběhu testování aktivováno). Dobíjeny byly akumulátory na napětí 4,2 V, proudem maximálně 2,5 A. K testování je použit vyrobený prototyp, jehož zapojení je upraveno, aby bylo shodné s výsledným zapojením navrženým v této diplomové práci. Jediným rozdílem jsou sloučené měřicí a výkonové svorky krajních akumulátorů u prototypu.



Obrázek 8.1 Změřená nabíjecí charakteristika – napětí



Obrázek 8.2 Změřená nabíjecí charakteristika – proud



Obrázek 8.3 Změřená nabíjecí charakteristika – teplota/stav nabití

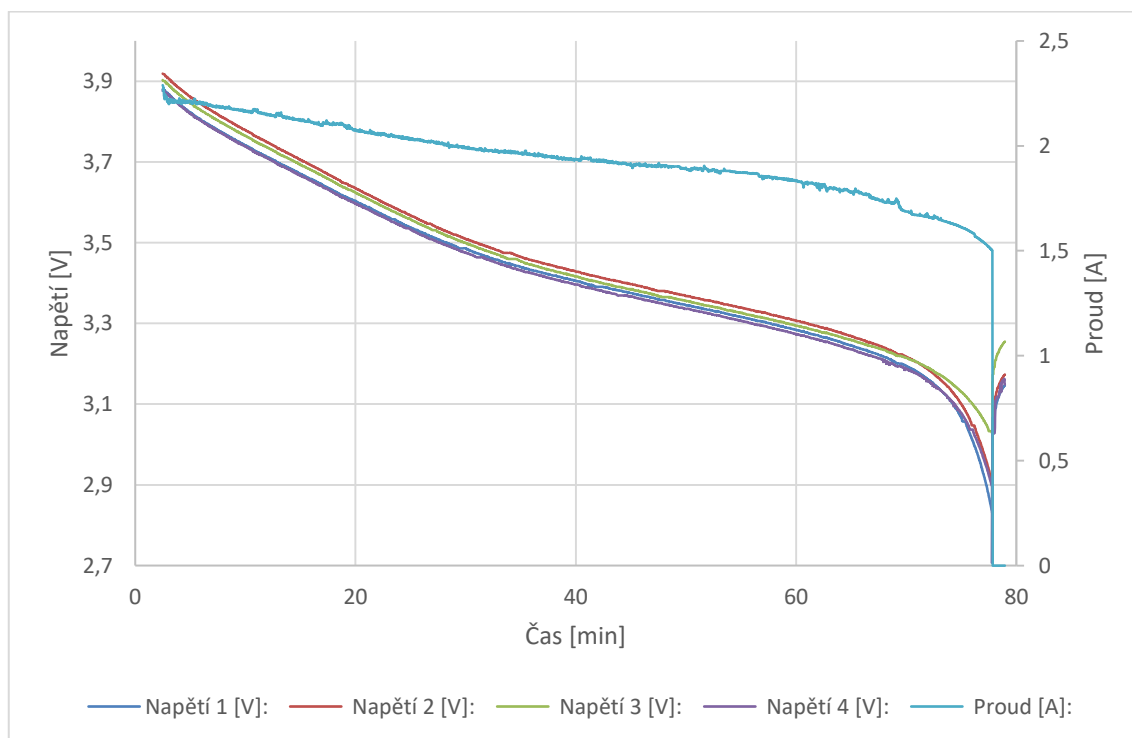
Graf na obrázku 8.1 zobrazuje průběh napětí a na obrázku 8.2 proudu při nabíjení akumulátorů. V grafu je vidět část nabíjení konstantním proudem (maximální proud 2,5 A), po dosažení maximálního napětí (4,20 V) následována částí nabíjení konstantním napětím, až po dosažení ukončovacího proudu 100 mA. V průběhu nabíjení byly akumulátory balancovány a na konci nabíjení byl rozdíl napětí menší než 0,5 %. Tímto obvod prokázal schopnost nabíjet a balancovat akumulátory.

Jak na grafu napětí, tak i proudu je vidět v 38. minutě záporná špička, ta je způsobena měřením odporu akumulátorů. Jejich změřené vnitřní odpory jsou:

- 1. akumulátor: 69 mΩ
- 2. akumulátor: 58 mΩ
- 3. akumulátor: 62 mΩ
- 4. akumulátor: 68 mΩ

U 1. a 4. akumulátoru je měřená hodnota zatížena chybou, jelikož jsou krajní měřicí a výkonové svorky sloučeny (ve finálním návrhu opraveno). U 2. a 3. akumulátoru se však změřená hodnota liší jen o 2 mΩ oproti katalogové hodnotě.

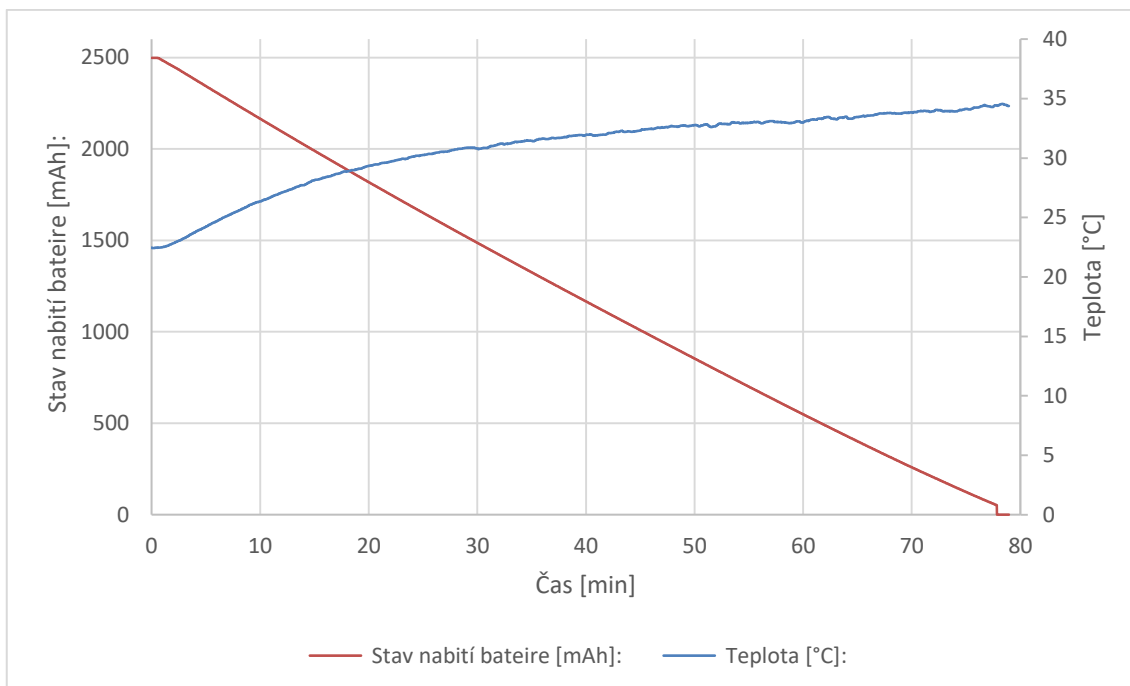
Graf na obrázku 8.3 zachycuje měření stavu nabití baterie. Celková kapacita změřená na konci nabíjení byla 2558 mAh. Dále je také na grafu průběh teploty během nabíjení, kdy je vidět narůstající teplota akumulátoru při nabíjení maximálním proudem až na hodnotu 39,5 °C, následně s klesajícím nabíjecím proudem teplota klesá.



Obrázek 8.4 Změřená vybíjecí charakteristika akumulátoru – napětí/proud

Z grafu na obrázku 8.4 je vidět správná funkce ochrany proti podpětí, kdy byly akumulátory odpojeny po dosažení napětí 2,75 V.

Dále je na obrázku 8.5 zobrazen graf stavu nabití, který končí na hodnotě 52 mAh, což znamená, že celková vybitá energie byla 2448 mAh. Na konci vybití je vidět následná úprava stavu nabití na 0 mAh, jelikož bylo dosaženo minimálního napětí. Druhý graf na obrázku zobrazuje nárůst teploty během vybití. Maximální teplota při vybití byla 34,6 °C.



Obrázek 8.5 Změřená vybíjecí charakteristika akumulátoru – stav nabití/teplota

V rámci testování byly vyzkoušeny i ochrany proti podpětí, přepětí, nadproudu a nízké a vysoké teplotě. Veškeré ochrany zareagovaly dle nastavených parametrů. Pro testování teplotních ochran byly nastaveny limity mimo aktuální teplotu, aby nebylo nutné akumulátory zahřívat, nebo ochlazovat.

9 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a realizovat inteligentní baterii. V mé práci jsem provedl rešerši lithiových akumulátorů a dostupných řešení. Dále jsem se snažil přiblížit proces nabíjení a vybíjení těchto akumulátorů.

Na základě požadovaných parametrů jsem provedl detailní návrh nabíjecího obvodu společně s výpočtem parametrů součástek. Dále jsem vybral vhodný mikrokontroler a integrovaný obvod pro měření a ochranu akumulátorů, ke kterému jsem vybral vhodné součástky periferních obvodů.

V další kapitole se zabývám firmwarem mikrokontroleru a vysvětluji zde, jak je dosaženo co nejnižší spotřeby a jak jsou prioritně obsluhovány jednotlivé funkce. Dále zde popisují řídicí algoritmus nabíjení a zpracovávání měřených dat. V následující kapitole se zabývám počítačovou aplikací a jejím uživatelským rozhraním.

Výsledkem mé práce je plně funkční obvod, který je součástí čtyř akumulátorů. Dokáže je korektně nabíjet, balancovat, hlídat jejich správné vybíjení a případně je odpojit. Dále komunikuje s počítačovou aplikací, ze které může uživatel měnit parametry a zobrazovat aktuální informace o baterii. Další možností je vyčtení krátké a dlouhé historie baterie, které zobrazí, co se s baterií dělo v posledních několika hodinách, respektive zobrazí denní souhrny za delší časový úsek. Obvod byl otestován a výsledky testování jsou uvedeny v poslední kapitole.

Přínosem mnou navrženého obvodu je možnost připojení k jakýmkoliv čtyřem lithiovým akumulátorům, jelikož si uživatel může pomocí aplikace nastavit její parametry, a tudíž se z běžných akumulátorů stává inteligentní baterie.

Možnosti zlepšení vyrobeného obvodu jsou závislé na výsledném využití, kvůli jejich různým požadavkům. Dalším možným zlepšením by byla optimalizace softwarového vybavení, hlavně vylepšení algoritmu pro určování zbývající kapacity, který by mohl brát v úvahu, kromě proudu, i aktuální napětí akumulátorů společně s vnitřním odporem.

Literatura

- [1] TICHÝ, Jiří. Lithiové akumulátory. V: tzbinfo [online]. 21. 12. 2015 [cit. 10. 11. 2017] Dostupné z: oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory
- [2] BATTEX. Prizmatické lithiové akumulátorové články [online]. © 2009–2017 [cit. 10. 11. 2017] Dostupné z: www.battex.info/hermeticke-akumulatory/li-akumulatory/prizmaticke-lithiove-akumulatorove-clanky
- [3] BATTEX. Základní charakteristiky [online]. © 2009–2017 [cit. 10. 11. 2017]. Dostupné z: battex.info/hermeticke-akumulatory/li-akumulatory/zakladni-charakteristiky
- [4] BATTERY UNIVERSITY. BU-501a: Discharge Characteristics of Li-ion. [online]. © 2017 [cit. 10. 11. 2017] Dostupné z: batteryuniversity.com/learn/article/discharge_characteristics_li
- [5] BATTERY UNIVERSITY. BU-409: Charging Lithium-ion. [online]. © 2017 [cit. 10. 11. 2017] Dostupné z: batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries
- [6] STACKEXCHANGE. How to make an efficient small scale heater powered by a battery? [online]. © 2018 [cit. 03. 02. 2018] Dostupné z: electronics.stackexchange.com/questions/318330/how-to-make-an-efficient-small-scale-heater-powered-by-a-battery/318337#318337
- [7] DJI FORUM. How do Intelligent Batteries Work? [online]. © 2018 [cit. 04. 03. 2018] Dostupné z: <https://forum.dji.com/thread-38174-1-1.html>
- [8] PHANTOMPILOTS. Battery Cell Overdischarge Situations [online]. © 2010-2017 [cit. 10. 11. 2017] Dostupné z: phantompilots.com/threads/battery-cell-overdischarge-situations.45913/
- [9] MAXIM INTEGRATED. Battery fuel gauges [online]. © 2017 [cit. 10. 11. 2017] Dostupné z: www.maximintegrated.com/en/products/power/battery-management/battery-fuel-gauges.html
- [10] TEXAS INSTRUMENTS Cell balancing buys extra run time and battery life. [online]. © 2009 [cit. 03. 02. 2018] Dostupné z: www.ti.com/lit/an/slyt322/slyt322.pdf
- [11] MAXIM INTEGRATED. High-Precision Li+ Battery Monitor With Alerts. [online]. © 2003 [cit. 10. 11. 2017] Dostupné z: datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS2762.pdf
- [12] INTERSIL. ISL94202 [online]. © 2016-2017 [cit. 10. 11. 2017] Dostupné z: www.intersil.com/content/dam/Intersil/documents/isl9/isl94202.pdf
- [13] TEXAS INSTRUMENTS. bq769x0 3-Series to 15-Series Cell Battery Monitor Family for Li-Ion and Phosphate Applications. [online]. © 2017 [cit. 10. 11. 2017] Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq76940.pdf>

- [14] MICROCHIP. ATtiny1614 / ATtiny1616 / ATtiny1617 [online]. © 2017 [cit. 10. 11. 2017] Dostupné z: ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001893B.pdf
- [15] ATMEL. AT24C32D [online]. © 2015 [cit. 10. 11. 2017]. Dostupné z: www.atmel.com/images/Atmel-8866-EEPROM-AT24C32D-Datasheet.pdf
- [16] TEXAS INSTRUMENTS. ISO742x Low-Power Dual-Channel Digital Isolators [online]. © 2016 [cit. 10. 11. 2017] Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso7421.pdf>
- [17] TIETZE, Ulrich a Christoph SCHENK. Electronic circuits: design and applications. Berlin: Springer-Verlag, 1991. ISBN 3-540-50608-x.
- [18] COILCRAFT. Shielded Power Inductors–MSS1583 [online]. © 2017 [cit. 10. 11. 2017] Dostupné z: <https://www.coilcraft.com/pdfs/mss1583.pdf>
- [19] COILCRAFT. Power Inductor Analysis & Comparison Tool [online]. © 2017 [cit. 10. 11. 2017] Dostupné z: https://www.coilcraft.com/apps/power_tools/compare/
- [20] INFINEON TECHNOLOGIES. IR2101(S)/IR2102(S) & (PbF) [online]. 2004 [cit. 10. 11. 2017] Dostupné z: <https://www.infineon.com/dgdl/Infineon--DS-vNAEN.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c7a755166c>
- [21] TEXAS INSTRUMENTS. CSD17581Q5A 30-V N-Channel NexFET™ Power MOSFETs [online]. © 2016 [cit. 10. 11. 2017] Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/csd17581q5a.pdf>
- [22] PANASONIC. DB2441700L [online]. 2013 [cit. 10. 11. 2017] Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1916074.pdf>
- [23] IXYS. DPG10I200PA [online]. © 2013 [cit. 10. 11. 2017] Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/205/DPG10I200PA-1110124.pdf>
- [24] SEMITEC-USA. AT THERMISTOR [online]. [cit. 10. 11. 2017] Dostupné z: <http://www.semitec-usa.com/downloads/atthermistor.pdf>
- [25] TEXAS INSTRUMENTS. bq769x0 Family Top 10 Design Considerations [online]. © 2016 [cit. 10. 11. 2017] Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva749a/slva749a.pdf>
- [26] TEXAS INSTRUMENTS. 10s Battery Pack Monitoring, Balancing, and Comprehensive Protection, 50-A Discharge Reference Design [online]. © 2016 [cit. 10. 11. 2017] Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/tiduar8b/tiduar8b.pdf>
- [27] NEXCELL BATTERY CO.,LTD. Specification for Li-ion Rechargeable cylindrical battery [online]. [cit. 01. 01. 2018] Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.540-448.1.pdf>

Seznam symbolů, veličin a zkratek

UART	universální asynchronní sériová sběrnice
RxD	pin UART protokolu pro příjem dat
TxD	pin UART protokolu pro odesílání dat
I2C (TWI)	dvoudrátová sběrnice
SDA	datový pin protokolu I2C
SCL	pin protokolu I2C s hodinovým signálem
uC	mikrokontroler
V	volty
A	ampéry
Ah	ampér-hodiny
Hz	hertz
B	byt (byte)
b	bit
RTC	čítač reálného času
PIT	periodický časovač přerušení
EEPROM	elektricky mazatelná paměť
CSV	souborový formát pro tabulková data
PWM	pulsně šířková modulace
DPS	deska plošného spoje
ADC	analogově-digitální převodník
DAC	digitálně-analogový převodník

Seznam obrázků

Obrázek 2.1 Vnitřní uspořádání lithiového akumulátoru [2]	10
Obrázek 2.2 Vybíjecí charakteristiky v závislosti na proudu [4]	11
Obrázek 2.3 Graf nabíjení akumulátoru [5]	12
Obrázek 2.4 Graf vlivu teploty na průběh vybíjení [6]	13
Obrázek 2.5 Zobrazované informace inteligentní baterie firmy DJI [7]	15
Obrázek 2.6 Logovaná data inteligentní baterie DJI [8]	15
Obrázek 3.1 Odporové balancování tří akumulátorů s externím MOSFET tranzistorem [10]	17
Obrázek 3.2 Balancování akumulátorů nábojovou pumpou [10]	18
Obrázek 4.1 Schéma snižujícího měniče	19
Obrázek 4.2 Schéma zvyšujícího měniče	20
Obrázek 4.3 Schéma řízeného lineárního stabilizátoru	20
Obrázek 5.1 Grafické zobrazení návrhu	21
Obrázek 5.2 Blokové schéma vnitřního uspořádání obvodu BQ76920 [13]	23
Obrázek 5.3 Spotřeba energie mikrokontroleru v aktivním stavu v závislosti na frekvenci [14]	26
Obrázek 5.4 Rozložení pinů mikrokontroleru [14]	26
Obrázek 5.5 Digitální izolátor ISO7421DR [16]	28
Obrázek 5.6 Graf potřebné indukčnosti v závislosti na výstupním napětí (vstupní napětí = 24 V)	29
Obrázek 5.7 Řízení tranzistoru odporovým děličem	31
Obrázek 5.8 Zapojení high-side driveru [20]	31
Obrázek 5.9 Schéma výsledného zapojení měniče	33
Obrázek 5.10 Závislost chyby měření na teplotě [24]	34
Obrázek 5.11 Dělič napětí na vstupu	35
Obrázek 5.12 Napájení obvodu BQ76920 [25]	36
Obrázek 5.13 Horní strana plošného spoje	37
Obrázek 5.14 Spodní strana plošného spoje	37
Obrázek 6.1 Vývojový diagram obsluhy přerušení RXT UART	44
Obrázek 6.2 Funkce generování PWM signálu časovačem TCD [14]	46
Obrázek 6.3 Časový diagram převodu jednoho vzorku [14]	48
Obrázek 6.4 Zjednodušený vývojový diagram nabíjení	49
Obrázek 7.1 Počítačová aplikace – horní část	51
Obrázek 7.2 Počítačová aplikace – grafické ukazatele	51
Obrázek 7.3 Počítačová aplikace – nastavení	52
Obrázek 7.4 Nastavení aktualizace a ukládání dat	54
Obrázek 7.5 Ukládání krátké a dlouhé historie	54

Obrázek 8.1 Změřená nabíjecí charakteristika – napětí	55
Obrázek 8.2 Změřená nabíjecí charakteristika – proud	56
Obrázek 8.3 Změřená nabíjecí charakteristika – teplota/stav nabití	56
Obrázek 8.4 Změřená vybíjecí charakteristika akumulátoru – napětí/proud	57
Obrázek 8.5 Změřená vybíjecí charakteristika akumulátoru – stav nabití/teplota	58
Obrázek 9.1 Návrh plošného spoje (použitý u prototypu)	66
Obrázek 9.2 Hotová deska plošného spoje (prototyp)	66
Obrázek 9.3 Schéma obvodu inteligentní baterie (část 1)	67
Obrázek 9.4 Schéma obvodu inteligentní baterie (část 2)	68
Obrázek 9.5 Počítačová aplikace	69

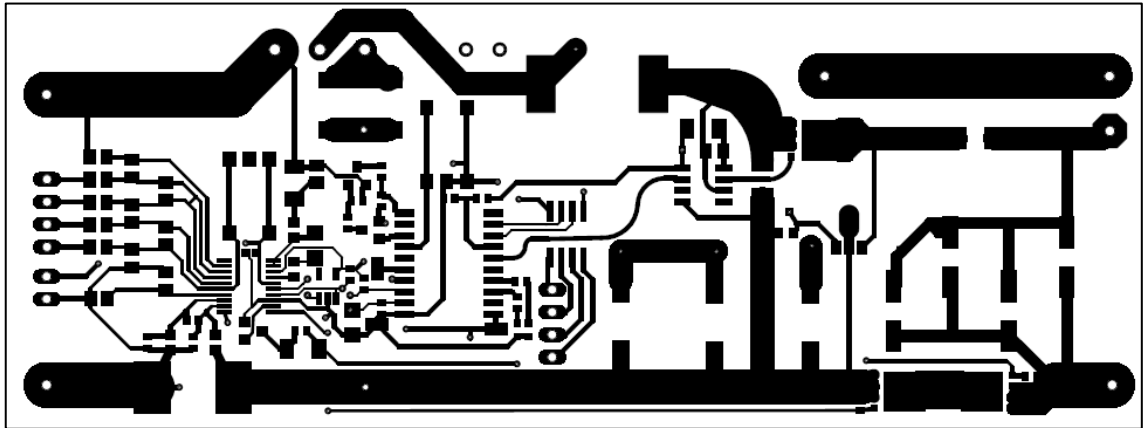
Seznam tabulek

Tabulka 5.1 Srovnání obvodů od tří výrobců.....	24
Tabulka 5.2 Ukázka funkce generování PWM.....	27
Tabulka 5.3 Parametry paměti EEPROM [15].....	28
Tabulka 5.4 Indukčnost cívky v závislosti na stejnosměrném proudu při frekvenci 39 kHz [19]	30
Tabulka 5.5 Parametry tranzistoru CSD17581Q5A [21]	32
Tabulka 6.1 Struktura paketu.....	43
Tabulka 6.2 Náhrada zakázaných bytů.....	43
Tabulka 6.3 Struktura dat v první části	45
Tabulka 6.4 Struktura dat ve druhé části.....	45
Tabulka 6.5 Struktura dat ve třetí části	46
Tabulka 6.6 Funkce LED	50
Tabulka 7.1 Možnosti přenosu dat přes UART – čtení (0)	53
Tabulka 7.2 Možnosti přenosu dat přes UART – zápis (1)	53
Tabulka 7.3 Ukázka ukládaných dat v souboru CSV	54
Tabulka 7.4 Ukázka ukládaných dat krátké historie v souboru CSV	54
Tabulka 7.5 Ukázka ukládaných dat dlouhé historie v souboru CSV	54
Tabulka 8.1 Parametry akumulátoru pro testování [27].....	55

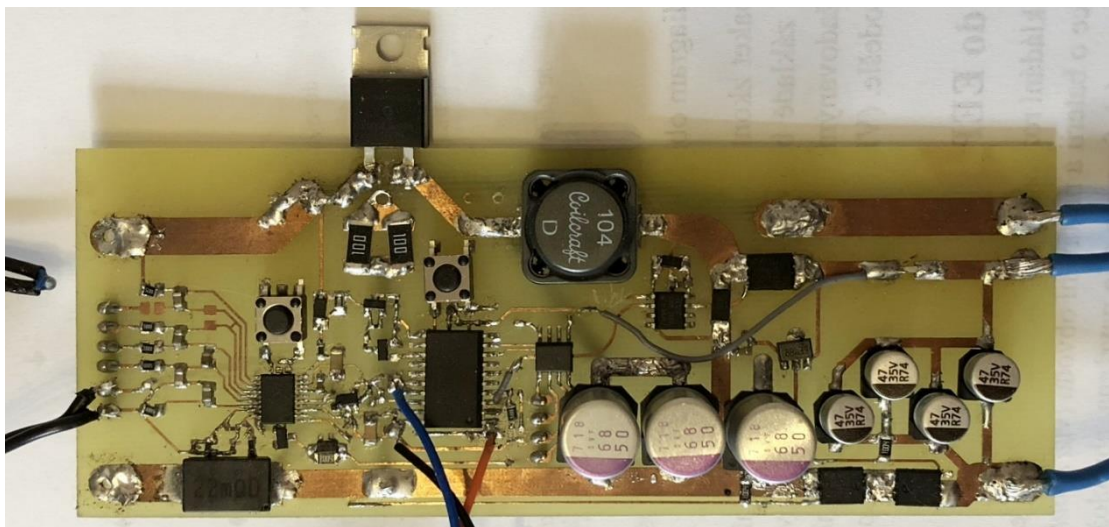
Seznam příloh

- Příloha 1. Zdrojový kód programu
- Příloha 2. Zdrojový kód počítačové aplikace
- Příloha 3. Schéma a návrh DPS obvodu

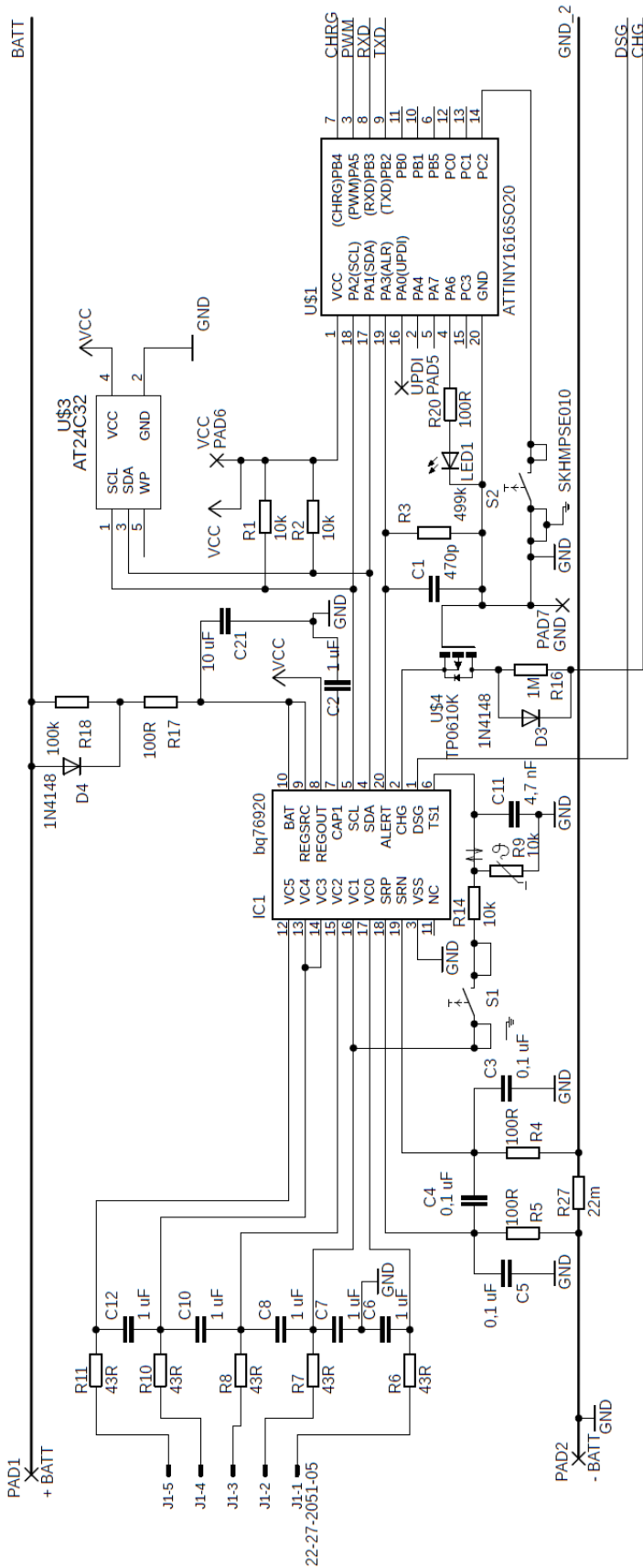
Obrázové přílohy



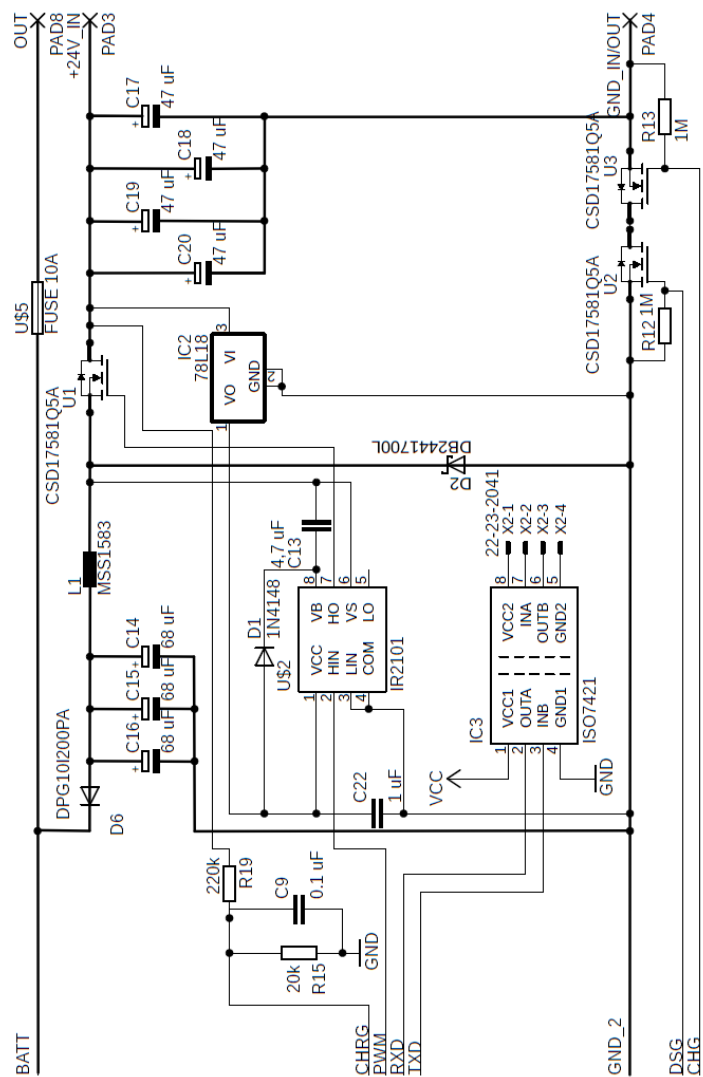
Obrázek 9.1 Návrh plošného spoje (použitý u prototypu)



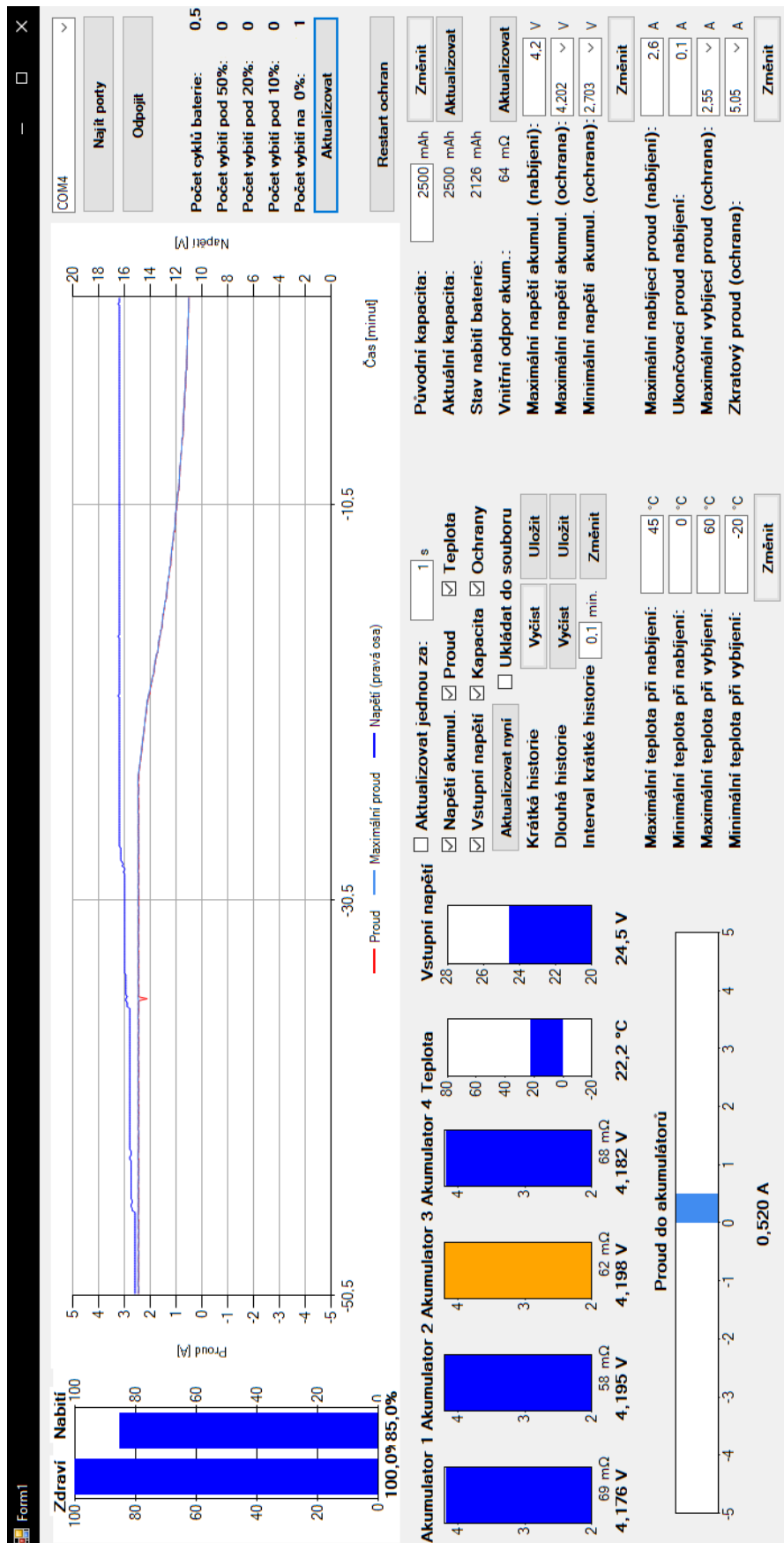
Obrázek 9.2 Hotová deska plošného spoje (prototyp)



Obrázek 9.3 Schéma obvodu inteligentní baterie (část 1)



Obrázek 9.4 Schéma obvodu inteligentní baterie (část 2)



Obrázek 9.5 Počítačová aplikace