

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh elektroniky pro systém řízení akumulátorů (BMS)

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **David TRUHLÁŘ**
Osobní číslo: **E16B0066P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Návrh elektroniky pro systém řízení akumulátorů (BMS)**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací elektroniky pro balancování baterií pro elektrická vozidla.

1. Definujte funkci a parametry BMS systému pro elektrická vozidla.
2. Navrhněte schéma a desku plošných spojů v návrhovém SW Altium Designer.
3. Vyberte vhodné polovodičové součástky.
4. Sestavte navržené zařízení pro BMS a experimentálně ověřte jeho funkci.

Navržené zařízení bude sloužit jako univerzální prostředek pro správu baterií u elektrických vozidel postavených na katedře KEV.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/680412fc.pdf>.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Bedřich Bednář

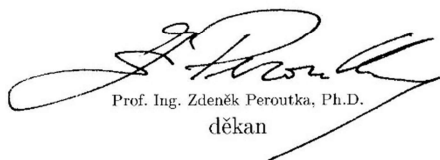
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce:

5. října 2018

Termín odevzdání bakalářské práce:

13. června 2019


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Práce je rozčleněna do tří částí. První část se zabývá porovnání jednotlivých druhů bateriových článků. V této části jsou shrnuty jejich výhody a nevýhody, způsoby nabíjení a způsoby ukončení nabíjení. Druhá část je zaměřena na vysvětlení a pochopení, proč je nutné ve složitějších aplikacích použití systému správy baterií, který chrání baterie před jevy, které mohou nastat při nehlídání stavu baterií při jejich nabíjení nebo vybíjení a jaké jsou možnosti předcházení těchto jevů. Mezi tyto jevy může patřit ztráta kapacity, nebo dokonce zničení článku. Poslední část je zaměřena na návrh DPS. Nejprve byly porovnány dva integrované obvody sloužící pro monitorování baterií. Poté byl vybrán integrovaný obvod, pro který bylo následně vytvořeno podrobné schéma zapojení.

Klíčová slova

Baterie, BMS, balancování, Daisy-chain

Abstract

The work is divided into three parts. The first part deals with the comparison of different types of cells. In this part are summarized their advantages and disadvantages, methods of charging and ways of termination of charging. The second part is focused on explaining and understanding why it is necessary to use a battery management system in more complex applications, which protects the batteries from phenomena that may occur when the batteries are not being charged while being charged or discharged and what are the possibilities of preventing these. These phenomena may include loss of capacity or even destruction of the article. The third is focused on PCB design. First compared the two integrated circuits used for battery monitoring. Then an integrated circuit was selected for which a detailed wiring diagram was created.

Key words

Battery, BMS, balancing, Daisy-chain

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 12.6.2019

Jméno příjmení

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Bedřichu Bednářovi, za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Luboši Streitovi a Ing. Janu Štěpánkovi za cenné rady při kreslení schématu v programu Altium Designer.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 BATERIE	11
1.1 NiCd AKUMULÁTOR.....	12
1.1.1 Nabíjení NiCd akumulátorů.....	14
1.2 NiMH AKUMULÁTOR.....	22
1.2.1 Nabíjení NiMH akumulátorů.....	22
1.3 LITHIOVÝ AKUMULÁTOR.....	23
1.3.1 LiFePO ₄	25
1.3.2 LiCoO ₂	25
2 BATTERY MANAGEMENT SYSTÉM (BMS)	26
2.1 PROCES BALANCOVÁNÍ ČLÁNKŮ.....	26
2.1.1 Aktivní balancování.....	27
2.1.2 Pasivní balancování.....	27
3 VÝBĚR BMS JEDNOTKY	28
3.1 VLASTNOSTI LTC6804.....	28
3.2 VLASTNOSTI BQ76PL455A-Q1.....	28
4 NÁVRH HARDWARU SYSTÉMU PRO SPRÁVU BATERIÍ	29
4.1 NÁVRH BALANČNÍHO OBVODU.....	29
4.2 NÁVRH ŘIDICÍ A NAPÁJECÍ ČÁSTI.....	32
4.3 NÁVRH ŘIDICÍ ČÁSTI BMS.....	35
4.4 NÁVRH OBVODU PRO MĚŘENÍ TEPLoty.....	39
4.5 NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ.....	40
5 BMS MODUL	40
ZÁVĚR	42
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	43
PŘÍLOHY	1

Úvod

Trendem dnešní doby je snižování emisí produkovaných osobními vozidly. Aby docházelo ke snížení těchto emisí, aplikují se do automobilů se spalovacími motory různé filtry pevných částic a podobné technologie. Absolutním trendem je však elektromobilita, která je dnes rozšířena také do cyklistiky v podobě eletekrol nebo také do městské hromadné dopravy, kdy jsou baterie s elektromotory implementovány do trolejbusů, aby se mohla rozšířit obslužná část. Aby životnost těchto článků byla co nejdélejší, je nutné zajistit správné dobíjení a udržování symetrických napěťových hladin v celém bateriovém celku. Pro sledování těchto hladin slouží systém řízení baterií (BMS).

Cílem této práce je navrhnout systém správy baterií pro Li-ion články, které jsou hojně používány také v aplikacích na ZČU v Plzni, mezi které patří například elektrická koloběžka, motokára a nyní v současné době je vyvíjena elektrická formule. Systém pro správu baterií slouží pro monitorování jednotlivých článků, měření jejich teplot a v případě, že by došlo k rozdílům mezi napěťovými hladinami, k jejich vyrovnání pomocí balančních obvodů. Hlavním požadavkem je univerzálnost a modulárnost tohoto systému, jelikož akupack může obsahovat jen několik článků (koloběžka), ale také několik set článků (elektromobil). Zařízení by mělo mít možnost komunikace s externími periferiemi (PC), ale primárně by mělo pracovat samostatně bez vnější obsluhy.

Seznam symbolů a zkratek

BMS.....	Battery Management Systém
DPS.....	Deska plošného spoje
A	Elektrický proud [Ampér]
V, U	Elektrické napětí [Volt]
P.....	Výkon [Watt]
C	Kapacita [Farad][mAh]
R	Elektrický odpor [Ohm]
SOC	Parametr určující kapacitu baterie; State Of Charge
OCV.....	Měření napětí naprázdno; Open Circuit Voltage
SOH	Parametr určující zdraví baterie; State Of Health
GND	Ground; zemnicí vodič
AFE.....	Analogový posuv úrovně
DC.....	Direct current, stejnosměrný proud
GPIO.....	General - purpose input/output
AUX	auxiliary, analogový vstup
CCCV	Constant Current followed by Constant Voltage
NiMh.....	Nikl metal – hydridový akumulátor
NiCd	Nikl kadmiový akumulátor

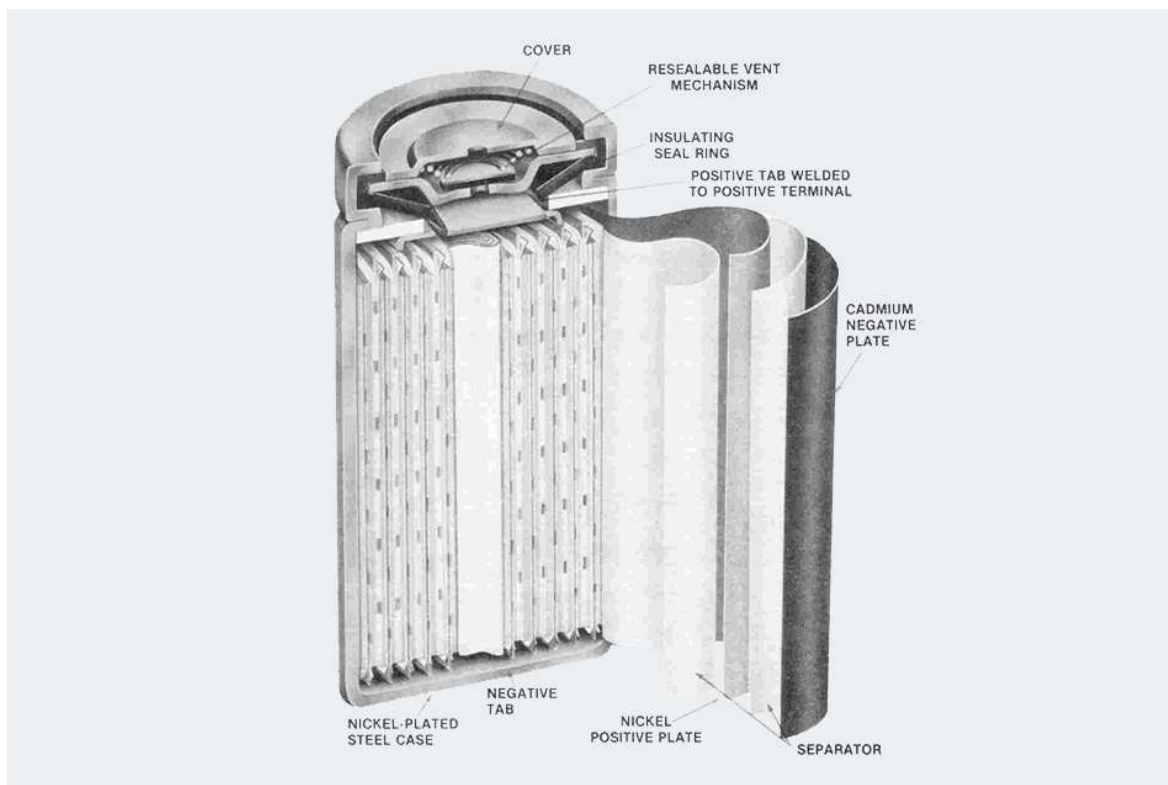
1 Baterie

Akumulátory slouží jako chemický zdroj elektrické energie. K tomu, aby došlo k nějaké chemické reakci, je potřeba minimálně 3 reaktantů, a to kladné elektrody neboli anody, záporné elektrody (katody) a prostředí, ve kterém může probíhat daná chemická reakce. Chemické reakce jsou odlišné, a to vlivem různě použitých chemických látek. Nejčastěji používané články bývají na bázi lithia, sloučeniny niklu a kadmia nebo niklu a metal-hydridu. Použití různých chemických látek závisí na tom, co je od baterií očekáváno. Může to být nízké samovybíjení, což může být užitečné v aplikacích, jako jsou třeba detektory kouře, bezdrátový zvonek, atd... Dalším parametrem může být třeba možný odebíraný proud. S tímto parametrem silně souvisí možnost rychlého nabíjení. Ne každý článek je schopen přeměnit chemické vazby tak rychle, aby nedošlo k přehřátí, nebo dokonce destrukci článku. Mezi další určující parametr může být zařazena životnost článku. Životností je myšlen počet nabíjecích cyklů.[1]

Pojem životnost je také dále definována dvěma parametry. Prvním parametrem je SOC (z angl. „State – Of – Charge“). Tento parametr určuje, jaká je aktuální kapacita baterie. V současnosti lze určit tento parametr s přesností $\pm 1\%$. Nejpřesnější metodou pro měření tohoto parametru je metoda (Impedance TrackTM). Ta spočívá v měření napětí naprázdno OCV (z angl. „Open Circuit Voltage“) a následné porovnání s tabulkovou hodnotou (Chemical ID Table). Poté je baterie buď nabíjena, nebo vybíjena v závislosti na stavu baterie. Po nějaké době je baterie odpojena a opět je změřeno její napětí naprázdno. Tento parametr je opět porovnán s (Chemical ID Table), a jelikož je známo množství energie dodané resp. odebrané (mAh), tak lze určit celkovou kapacitu baterie.[2]

Druhý parametr je označován SOH (z angl. „State – Of – Health“). Udává, jaký je celkový stav baterie. Tento parametr je určován jako poměr kapacity nové baterie a kapacity měřené baterie. Pro představu lze uvažovat novou baterii o kapacitě 10Ah. Vlivem stárnutí, nabíjení a vybíjení klesá její kapacita. Pokud změřená baterie bude mít 8Ah, tak parametr $SOH = 80\%$. Většina aplikací požaduje výměnu baterií v případě, že parametr $SOH = 75\%$ z důvodu spolehlivosti a možného selhání baterie.[2]

1.1 NiCd akumulátor

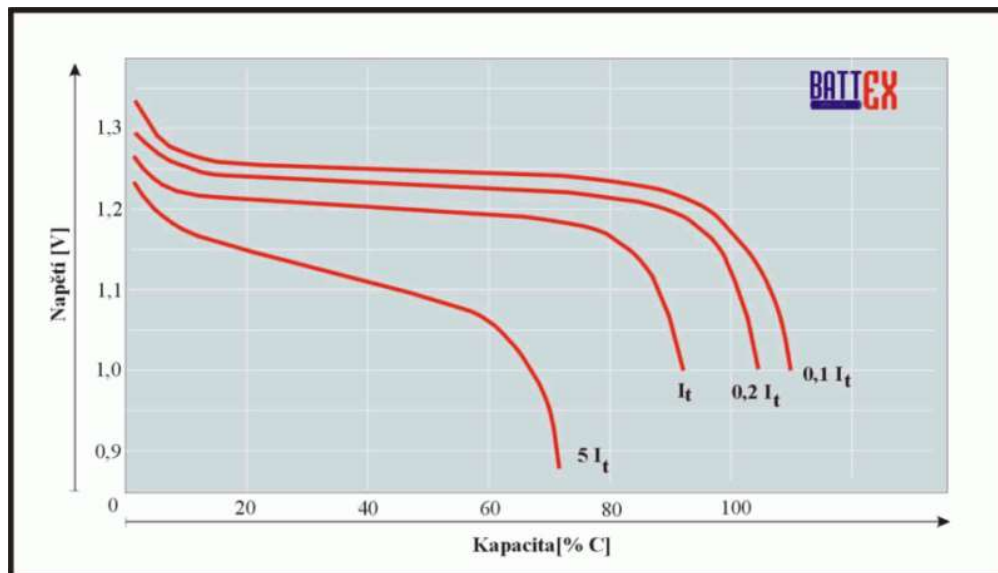


Obrázek 1 Strukturální řez NiCd akumulátoru [3]

Hlavní předností NiCd akumulátoru je jeho vysoká spolehlivost, životnost a možnost odběru velmi vysokých proudů. Tyto články lze také nabíjet velice rychle, a to až proudy, které odpovídají 1 - 4 násobku jejich kapacity ($1 - 4C$) [př.: $C=1000\text{mAh} \Rightarrow 1C = I=1\text{A}$]. Takto velikých nabíjecích proudů se dá využít pouze u akumulátorů se sintrovanými elektrodami, které se nejvíce užívají v akumulátorovém nářadí. Výhodou relativně rovné vybíjecí charakteristiky je konstantní výkon dodávaný do spotřebiče (Obrázek 2). Konec charakteristiky je velice strmý, což je výhodou, jelikož můžeme využít téměř celou kapacitu

akumulátoru a právě, pokud bychom nevyužívali celou kapacitu, docházelo by k takzvanému „paměťovému efektu“, kdy akumulátor ztrácí kapacitu. [4]

Dnes je již výroba těchto akumulátorů omezoována z důvodu obsahu nebezpečného kadmia. Vyráběny jsou už většinou pouze pro speciální aplikace.



Obrázek 2 Vybíjecí charakteristiky NiCd různými proudy při $t=20^{\circ}\text{C}$ [5]

1.1.1 Nabíjení NiCd akumulátorů

Nejčastěji používanou metodou pro nabíjení NiCd akumulátorů je metoda nabíjení konstantním proudem. Proud se nastavuje tak veliký, jak je stanoveno výrobcem akumulátoru. Odlišné však mohou být metody ukončení nabíjení. Moderní a kvalitní nabíječky využívají většinou spojení 2 – 3 metod ukončení nabíjení. [6]

Jedná se o tyto čtyři metody ukončení nabíjení:

- časové
- napěťové
- teplotní
- proudové

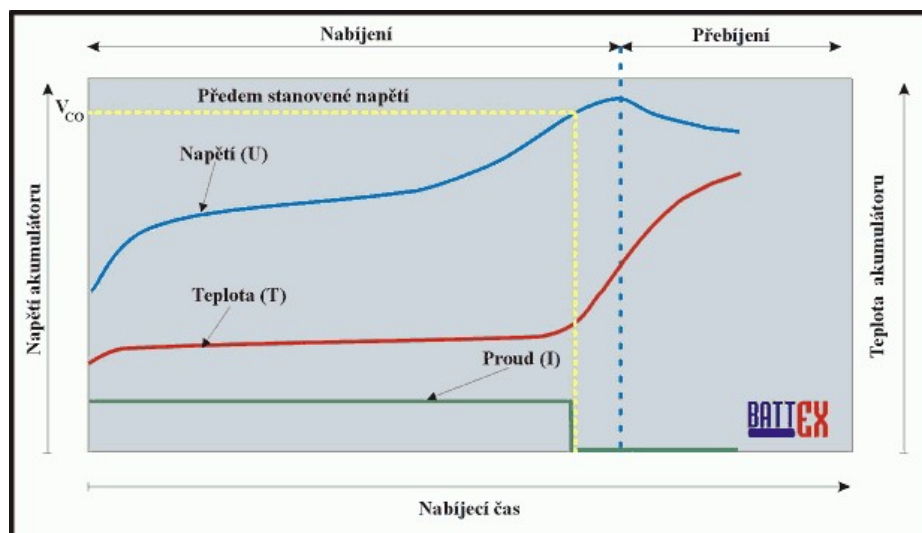
Ukončení časové

Touto metodou je akumulátor nabíjen proudem cca 0,1C a nejčastěji po dobu 14 – 16 hodin. Následně je buď odpojen od zdroje, nebo je přepnuto nabíjení na konzervační proud. Tato metoda sama o sobě není moc dobrá, protože pokud dáme nabíjet akumulátor, který je vybit pouze z 50%, tak se bude půl doby nabíjení nabíjet a půl doby nabíjení přebíjet, a akumulátor se bude nadměrně přehřívat. Přehřátému akumulátoru bude klesat napětí, a tak bude takto přebíjet akumulátor nabit na cca 50 – 60 % své kapacity.[7]

Ukončení napěťové

a) Metoda „V_{CO}“ - předem stanoveného napětí

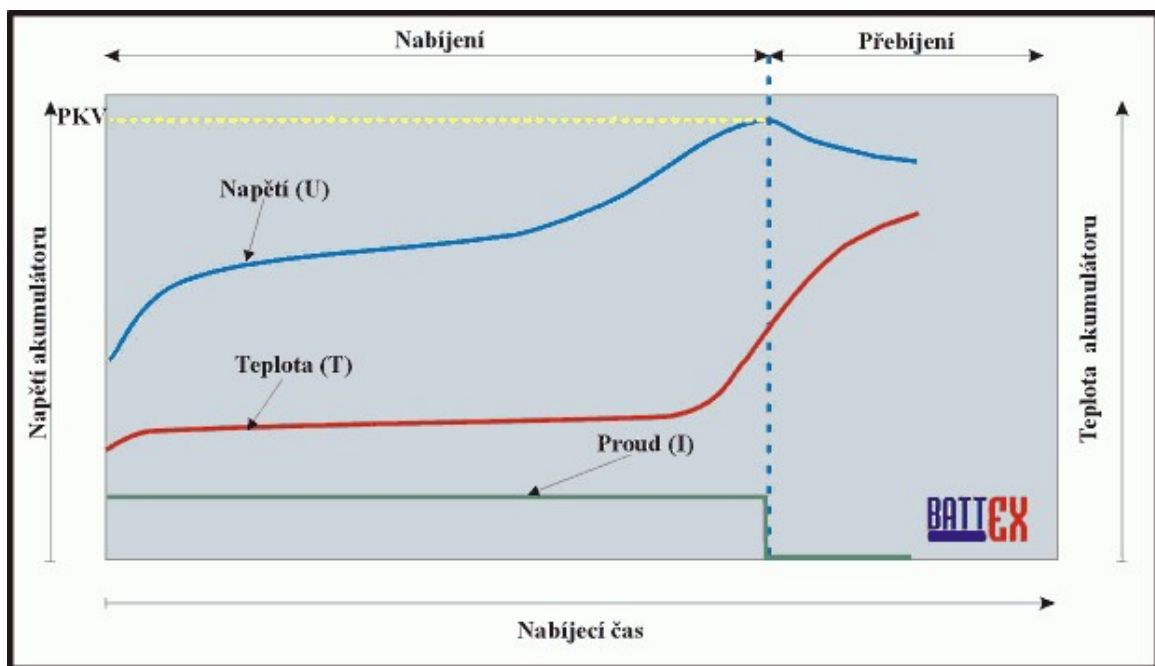
Index CO odvozen z anglického „Cut Off“. Při této metodě se ukončuje nabíjení po překročení předem stanovené hodnoty napětí (žlutá čára na Obrázek 3) dle nabíjecí křivky nabíjeného akumulátoru. Nevýhodou této metody je různost nabíjecích křivek v závislosti na teplotě, nebo také na tom, jak dlouho nebyl článek používán, a tak se tato metoda používá spíše jako dodatková.[8]



Obrázek 3 Průběh a ukončení nabíjení při metodě "Vco" [8]

b) Metoda „PKV“ - vrchol napětí

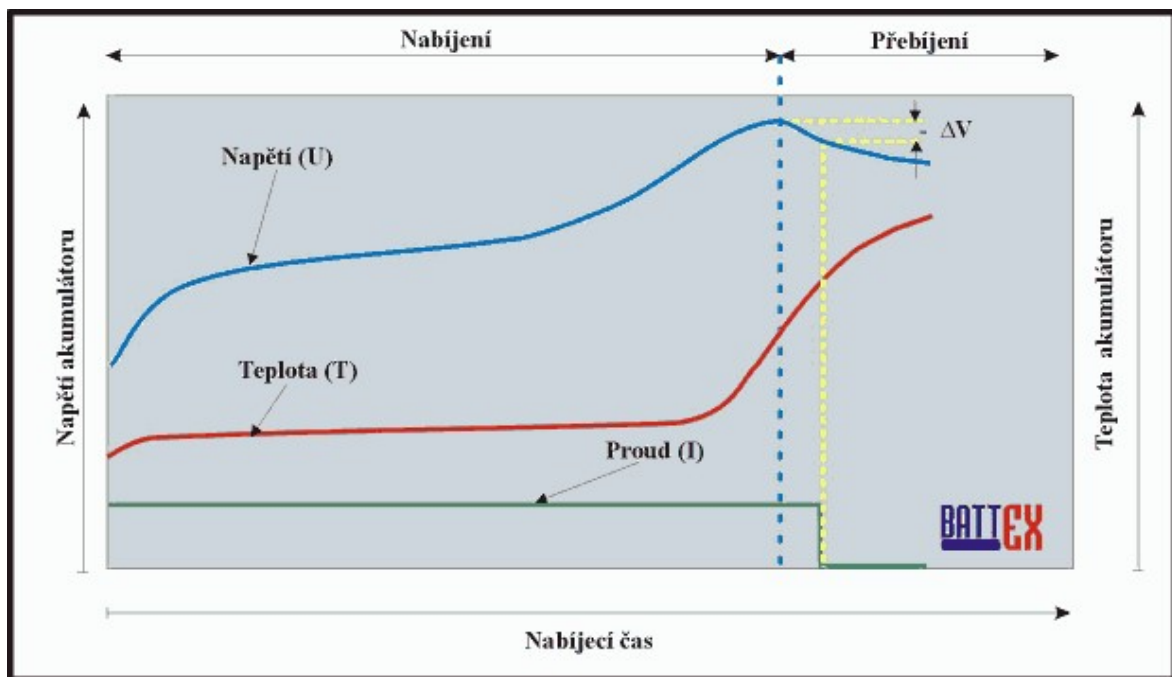
Tato metoda je spíše určena pro rychlonabíjení (0,5 – 2 C). Při této metodě se hlídá dosažení maximálního napětí (z anglického peak voltage detection, odtud PKV) (žlutá čára na Obrázek 4). Pro normální nabíjení je tato metoda nevyhovující z důvodu absence této napěťové špičky. Taktéž je nevhodná pro ultrarychlé nabíjení z důvodu zkreslení nabíjecí křivky vlivem vysokého oteplení.[9]



Obrázek 4 Průběh a ukončení nabíjení při metodě "PKV" [9]

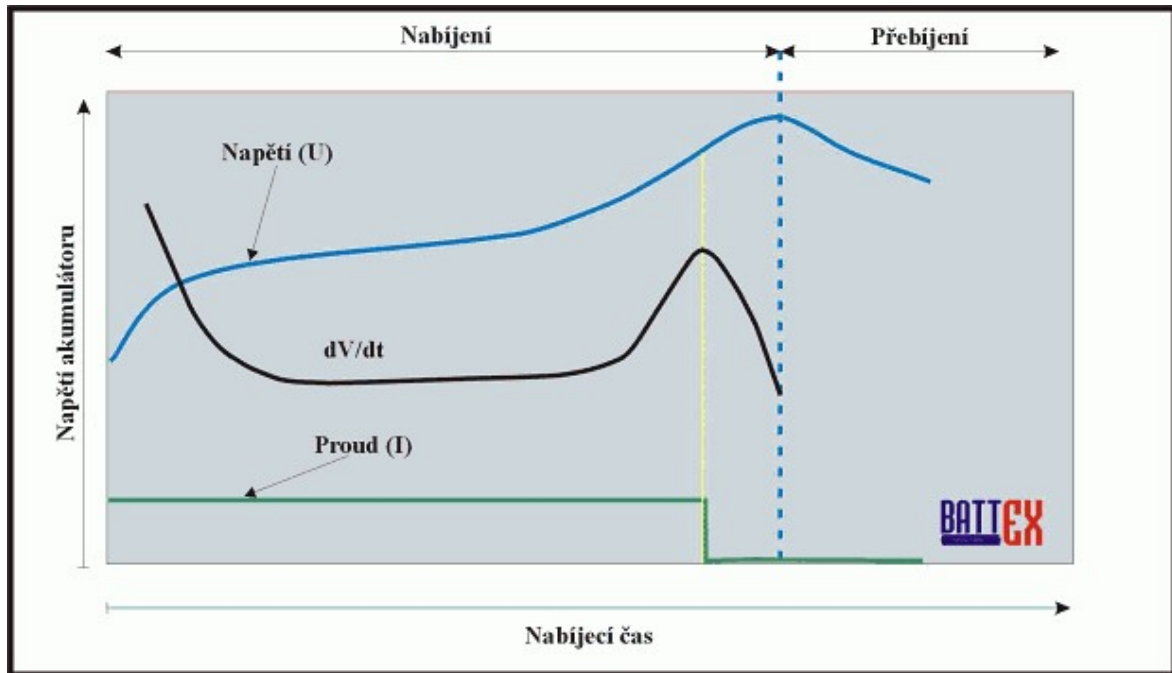
c) Metoda „ $-\Delta V$ “ – sledování poklesu napětí na konci nabíjení

Tato metoda je asi nejznámější. Sleduje se pokles napětí na konci nabíjecí křivky (Obrázek 5). Pro NiCd akumulátory je to 10mV a pro NiMH je stanovena hodnota 5mV. Tuto metodu v kombinaci s NiCd akumulátorem lze použít pouze při nabíjecích proudech od 0,5C do 2C. Pro proudy nižší by docházelo k přebíjení článků z důvodu lineárnějšího průběhu.[10]

Obrázek 5 Průběh a ukončení nabíjení metodou „ $-\Delta V$ “ [10]

d) Metoda „ d^2V/dt^2 “ - sledování druhé derivace napětí v čase

Tato metoda sleduje maximální napěťovou derivační špičku. V tomto okamžiku je nabíjení zastaveno (žlutá čára) (Obrázek 6). V tomto bodě není akumulátor plně nabit, a je ho potřeba připojit ke zdroji trvalého dobíjecího proudu. Z důvodu ukončení nabíjení před úplným nabitím je prodlužovaná životnost článku, jelikož nedochází k přebíjení [11]



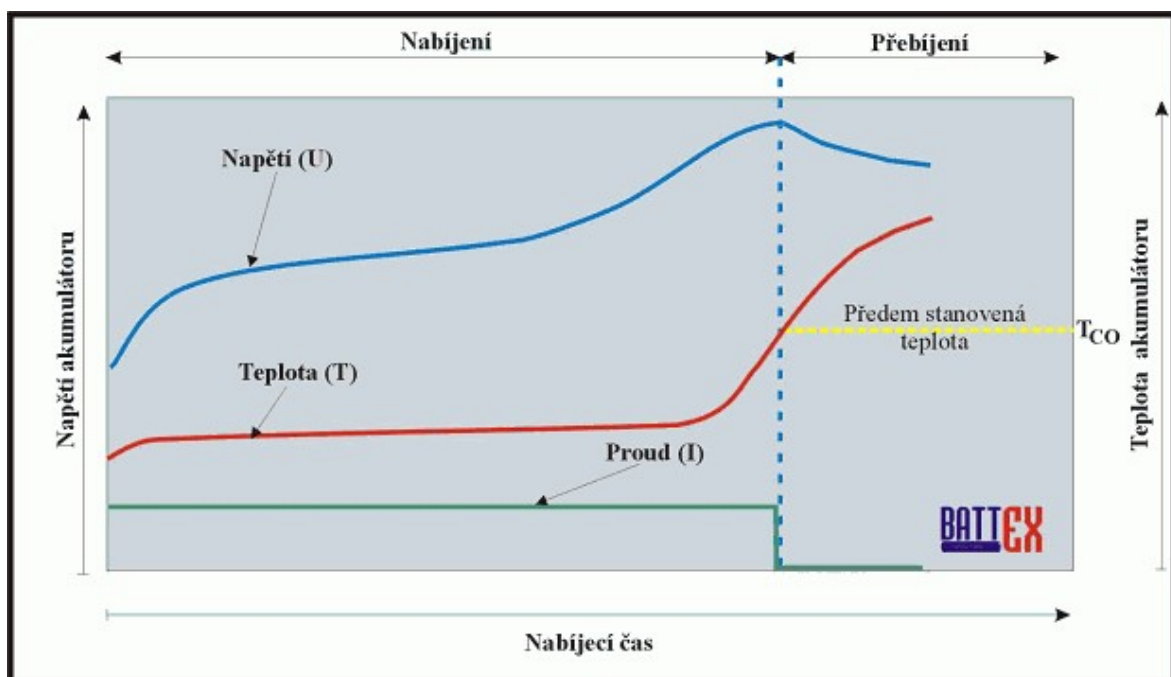
Obrázek 6 Průběh a ukončení nabíjení metodou „ d^2V/dt^2 “ [11]

Ukončení teplotní

S tímto druhem ukončení nabíjení se lze setkat u aku náradí, mobilů, notebooku atd.. Pro měření teploty je většinou používán NTC termistor se zápornou odporovou charakteristikou (odpor se vzrůstající teplotou klesá). Termistory je potřeba umisťovat co nejbližší k bateriím, nejlépe přímo na obal baterie, aby nedocházelo ke zkreslení teploty. [12]

a) Metoda „T_{CO}“ – metoda ukončení v předem stanovené teplotě

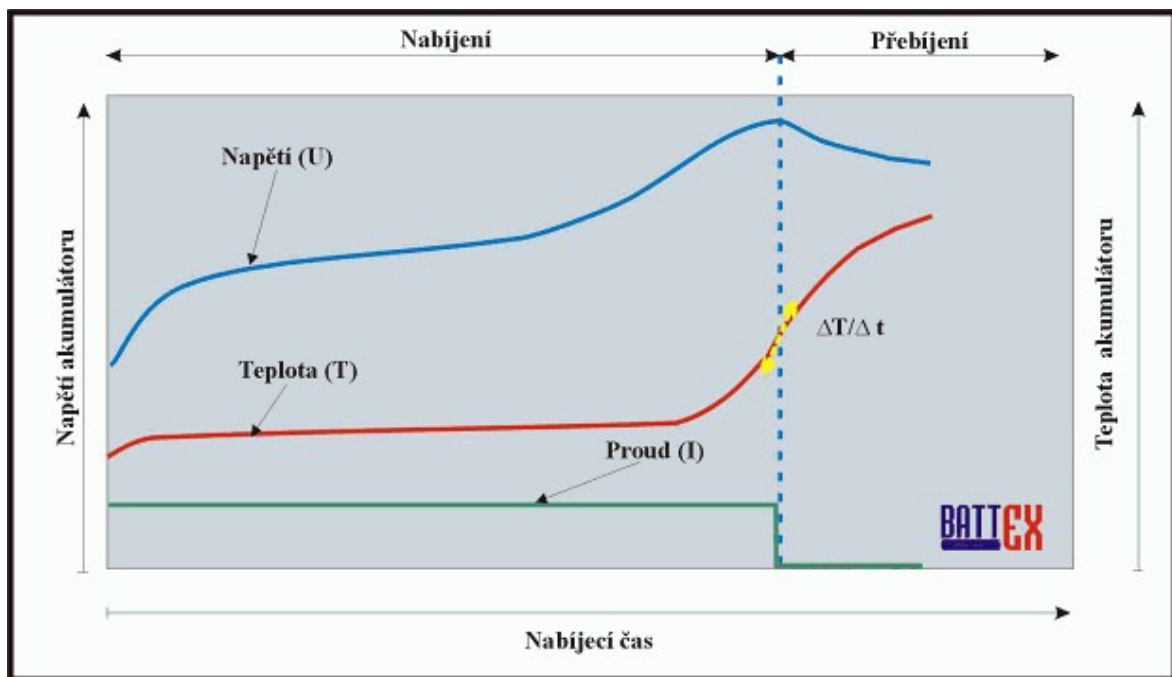
Při této metodě je z datasheetu baterie nastavena teplota (žlutá čára na Obrázek 7), při níž je ukončeno nabíjení a baterie je nabita. Většinou se tato teplota pohybuje okolo +45°C. Tato metoda je vhodná pro malé akumulátory do 2Ah při nabíjecím proudu 0,5 – 1 C a pro větší akumulátory nabíjené proudem 0,3 C. Při této metodě je potřeba brát v potaz, aby baterie měly standartní teplotu okolí a nebyly chlazeny nebo ohřívány vnějším teplem. Pokud by baterie byly chlazeny, docházelo by pak k jejich přebíjení, jelikož by se nedosáhlo teploty T_{CO}. V opačném případě by se akumulátor nenabil vůbec.[13]



Obrázek 7 Průběh a ukončení nabíjení metodou „T_{CO}“ [13]

b) Metoda $\Delta T/\Delta t$ – metoda ukončení při dané změně teploty v čase

Při této metodě je sledována změna teploty v čase (žlutá směřnice na Obrázek 8), kdy tato hodnota dosáhne hodnoty $0,5 - 1^\circ\text{C}/\text{minutu}$. Tato metoda je velice oblíbená, avšak přináší jednu nevýhodu, která se projevuje při připojení nabitého nebo ještě teplého článku. V tomto případě je baterie nabíjena, resp. přebíjena, a čeká na další informaci o teplotě a její změně v čase. [14]

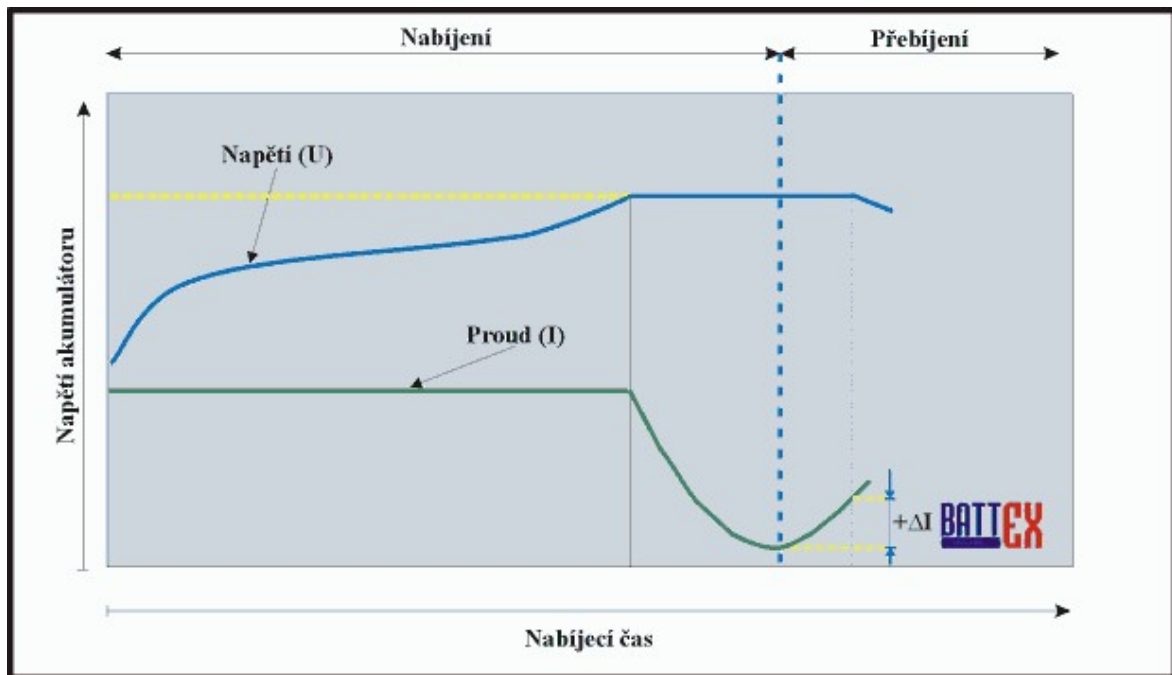


Obrázek 8 Průběh a ukončení nabíjení metodou změny teploty v čase [14]

Pokud ale budou spojeny dvě předešlé teplotní metody, stane se z nabíječky chytrější zařízení. Vložená teplá baterie nebude nabíjena. Počká se, až vychladne a až poté se zahájí nabíjení, které bude ukončeno metodou b). [14]

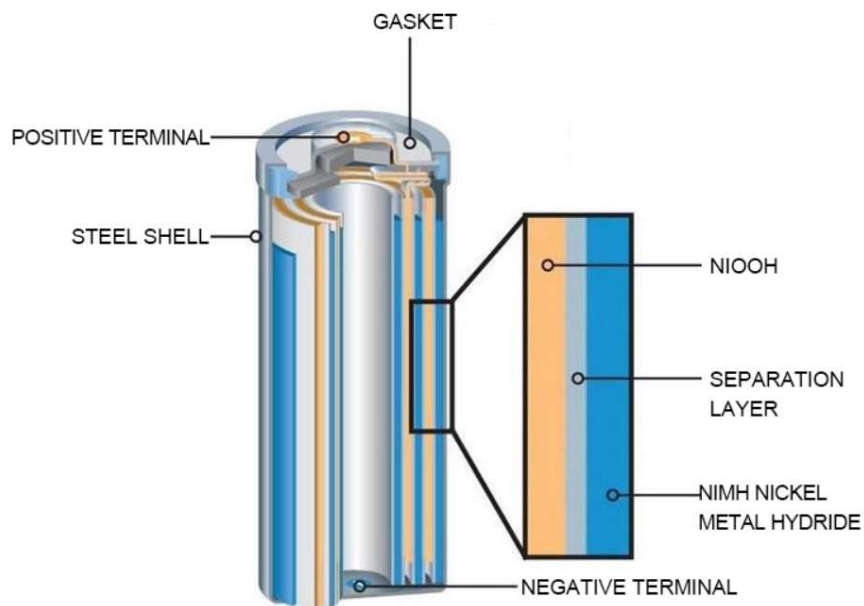
Ukončení proudové

Tato metoda není moc častá. Využívala se pouze u ultrarychlého nabíjení baterií pro ruční náradí. V první části je baterie nabíjena konstantním proudem. Po dosažení požadovaného napětí se přechází na nabíjení konstantním napětím, během kterého se čeká na nárůst proudu (Obrázek 9). Problém však nastává v případě zapojení teplé baterie, která požadovaného napětí nikdy nedosáhne, a tak dochází k přebíjení a k přehřívání baterie.[15]



Obrázek 9 Průběh a ukončení nabíjení proudovou metodou [15]

1.2 NiMH akumulátor



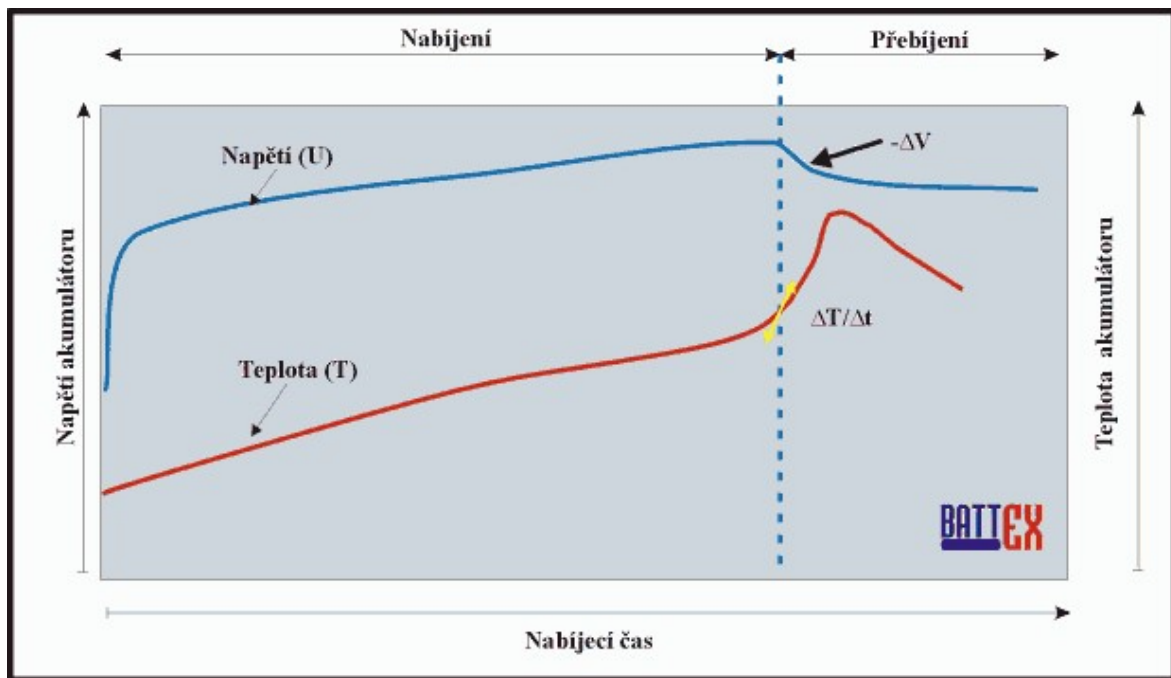
Obrázek 10 Strukturální řez NiMH baterie [16]

Tento druh akumulátoru je vylepšenou verzí předchozího akumulátoru (NiCd), avšak nikdy by neměly být zaměňovány (viz. 1.2.1). Je založen na použití látek, které příliš nezatěžují přírodu (hydroxid nikelnatý není tak ekologicky nebezpečný jako kadmium). Jako další pokrok ve vývoji přinesl absenci paměťového efektu. Nevýhodou těchto akumulátorů je větší samovybíjení a větší vnitřní odpor, kvůli čemuž nejsou základní typy vhodné pro rychlonabíjení. Avšak tento druh akumulátorů je v současnosti stále vyvíjen, a očekává se, že většina negativ se co nejvíce sníží, nebo úplně eliminuje. [17]

1.2.1 Nabíjení NiMH akumulátorů

Průběh nabíjení je poněkud odlišný od nabíjení NiCd baterií. Teplota NiMH baterie stoupá po celou dobu nabíjení. Až u konce nabíjení nastane strmější nárůst (Obrázek 11) oproti NiCd, kde se teplota během nabíjení příliš nemění. Dále platí, že čím větší nabíjecí proud použijeme, tím více se bude baterie zahřívat. Dalším specifickým při nabíjení NiMH baterie je mírný pokles napětí na konci nabíjení, a to -5mV při teplotě do $+25^\circ\text{C}$. Proto lze použít metodu pro ukončení nabíjení „ $-\Delta V$ “ (viz. 17). Pro vyšší teploty tuto metodu nelze použít. K tomuto poklesu dochází u NiCd baterie pouze u rychlonabíjení. Jako další z metod

lze použít obě teplotní metody (viz. str.19-20) a také časovou metodu. Naopak nevhodné jsou metody „PKV“ (viz. str.16) a „V_{CO}“ (viz str.15). [18]



Obrázek 11 Průběh a ukončení nabíjení NiMH baterie [18]

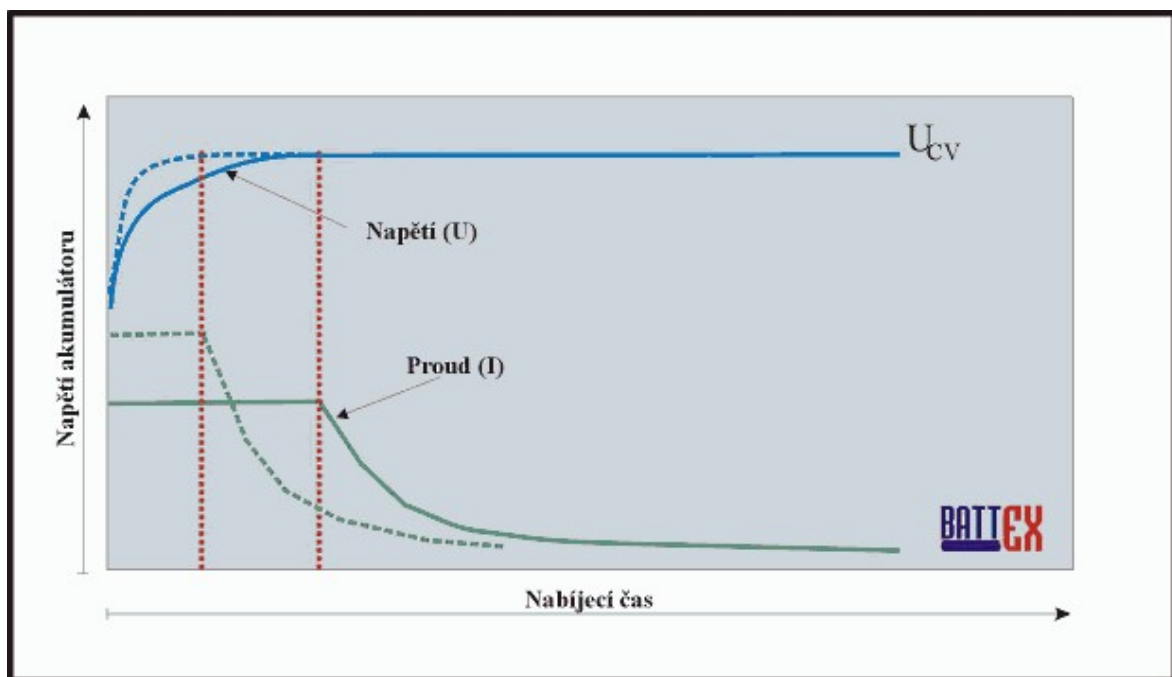
1.3 Lithiový akumulátor

Tento druh akumulátorů je dnes již asi nejvíce rozšířeným zdrojem elektrické energie. Mezi jeho přednosti patří dlouhá životnost (500 – 1500 cyklů), vysoká měrná energie až 200Wh/kg (cca 3x více než NiMH), a v neposlední řadě nízká hodnota samovybíjení (do 5%/měsíc). Dále pak vyniká tím, že nemá „paměťový efekt“. S ohledem na životní prostředí je samotná baterie absolutně ekologická. Pokud však není brán zřetel na výrobu. Naopak mezi nevýhody patří nízká zatížitelnost 1,5C a pomalé nabíjení 2C. To platí v případě běžně používaných baterií. Zde platí, že jako další nevýhoda je úplné zničení článku v případě poklesu napětí pod povolenou mez cca 2,8V. Proto je nutno baterie

dovybavovat ochrannými obvody, které jsou schopny udržovat baterii v rozmezí 20 – 80% celkové kapacity článku.

Lithiové články mohou mít různá jmenovitá napětí a to od 1,5 do 3,6V. Nejběžnější jsou ale lithiové články s napětím 3,6 a 3,2V [19], [20]

Nabíjení Lithiových baterií je prováděno metodou „CCCV“ (z angl. Constant Current followed by Constant Voltage). Jedná se o nabíjení konstantním proudem, které je po dosažení daného napětí přepnuto na nabíjení konstantním napětím až do doby, dokud neklesne proud pod 0,015 - 0,02C (Obrázek 12). Další možností je nabíjení časové, kdy je baterie nabíjena proudem 0,5C. Po dosažení daného napětí se pak nabíjí konstantním napětím po dobu 1 hodiny. Tato metoda je vhodná pouze pro nabíjení jednotlivých článků, nikoli pro nabíjení packů [21]



Obrázek 12 Průběh nabíjení Lithiových článků metodou „CCCV“ [21]

1.3.1 LiFePO₄



Obrázek 13 Bateriový článek LiFePO₄ [22]

Tento druh článku disponuje se jmenovitým napětím 3,2V. Mezi jeho priority patří vysoká proudová zatížitelnost (až 20C), a tak nachází uplatnění v elektromobilitě, aku-nářadí a v modelářství. Dnes jsou tyto akumulátory implementovány do ostrovních provozů jako záložní zdroje energie díky svému téměř nulovému samovybíjení a vysoké životnosti (cca 5000 cyklů) [23]

1.3.2 LiCoO₂



Obrázek 14 Bateriový článek LiCoO₂ [24]

Tento druh článku je hojně využívaným zdrojem energie. Jeho jmenovitá hodnota napětí je 3,6V. Mezi jeho přednosti patří nízká hmotnost při stejném množství energie v porovnání s ostatními články. Mezi nevýhody patří jeho nebezpečnost při porušení obalu, kdy dochází k bouřlivé reakci se vzduchem a následnému vzplanutí. [25]

2 Battery management systém (BMS)

Battery management system, neboli systém správy baterií, je elektrický systém kontrolující rovnoměrnost nabíjení a vybíjení baterií. Tato část systému nabíjení je důležitá pro prodloužení životnosti bateriových článků. Žádný z nabíjecích článků není identický a každý má různé, byť jen trochu, vlastnosti. Tento systém má za úkol primárně monitorovat napěťovou hladinu jednotlivých článků a teploty baterií. Dalším parametrem může být takzvaná kondice baterie určující, jak moc opotřebovaný je jednotlivý článek v závislosti na kapacitě článku SOC (viz. str. 11). Z těchto dílčích parametrů je ovlivňován proces nabíjení takzvaným balancováním. Balancování článků je nutné používat pro sériové nebo sério - paralelní zapojení akumulátorových soustav. Pokud by tento proces nebyl použit, docházelo by k přebíjení nebo k podbíjení bateriových článků, a to z důvodu rozdílných vlastností, jak již bylo zmiňováno. [26] [27]

2.1 Proces balancování článků

Příklad: Máme 2 články. Pro představu budeme uvažovat, že jsou z počátku oba dva články nabity na 100% své kapacity. Při vybíjení se jeden z článků (2.) bude vybíjet rychleji. Aby nedošlo k totálnímu podbití, ukončí proces vybíjení podpěťová ochrana. V tuto chvíli má ale první článek ještě určitou hladinu energie. Články začneme nabíjet. Aby nedošlo k přebíjení článku, odpojí baterie od nabíječky přepěťová ochrana. Avšak 2. článek není stále ještě plně nabit, a tak zůstává nabit jen z části. Pokud bychom tento proces několikrát opakovali, dojde k totálnímu poškození článku a ke ztrátě kapacity celého akumulátoru. Balancování je možno provádět dvěma způsoby. Tím prvním je aktivní balancování, druhým je pasivní balancování [27]

2.1.1 Aktivní balancování

Aktivní balancování pracuje na principu, kdy je z nejvíce nabitého článku odebrána energie a pomocí DC/DC měniče je energie přenesena do méně nabitého článku. Tato metoda je z pohledu efektivity nabíjení nejvýhodnější, avšak je složitá a drahá na realizaci. [28]

2.1.2 Pasivní balancování

Tento způsob balancování je, co se týče principu, velice jednoduchý a levný na realizaci. Principem tohoto způsobu je maření energie z nejvíce nabitého článku v teplo na odporu R (Obrázek 15).



Obrázek 15: Pasivního balanční obvod [29]

3 Výběr BMS jednotky

Jelikož bateriové systémy jsou poslední dobou velice diskutované téma, ať už z hlediska elektromobility, tak z hlediska ostrovních provozů mnoho výrobců mikroelektroniky se zabývá systémem správou dobíjení baterií (dále jen BMS). Pro danou aplikaci bylo na výběr mezi výrobcem *Linear Technology* LTC6804 (*LT*) a *Texas Instruments* BQ76PL455A-Q1 (*TI*).

3.1 Vlastnosti LTC6804

Tato BMS balanční jednotka je schopna monitorovat maximálně 12 článků. Přesnost měření je $\pm 1,2$ mV což by bylo taktéž přijatelné. Pro převod analogových hodnot z měření na digitální je zde použit 16 bitový AD převodník. [30]

3.2 Vlastnosti BQ76PL455A-Q1

Tato balanční jednotka je oproti předchozí popisované schopna monitorovat až 16 článků, což je sice více než u předchozího. Přesnost měření $\pm 0,75$ mV, což je o 0,45 mV lepší přesnost oproti předešlému. Jako největší odlišností je přítomnost osmi analogových vstupů, které mohou sloužit pro měření teploty, a navíc se tento počet může rozšířit o 5 digitálních vstupně výstupních pinů určených pro multiplexování dalších teplotních čidel. Tento obvod používá pro převod z analogové hodnoty na digitální 14 bitový AD převodník, což je sice méně než u předešlého, ale pro měření rozvážení napětí akumulátorových článků je více než dostatečný, což potvrzuje výpočet rozlišení převodníku v rovnici (1) [5]

$$\text{rozlišení převodu} = \frac{V_{REF}[mV]}{2^{\text{počet bitů}}} = \frac{2500}{2^{14}} = 0.152587890625 \text{ mV} \quad (1)$$

S ohledem na porovnání těchto dvou jednotek byl vybrán obvod od TI, a to kvůli možnosti rozsáhlejšího měření teplot, a navíc pro možnost balancování více článků při využití v jiných aplikacích. Dalším impulsem k vybrání tohoto obvodu byla dobrá zkušenost s výrobcem TI v předešlých aplikacích, které byly na katedře již realizovány.

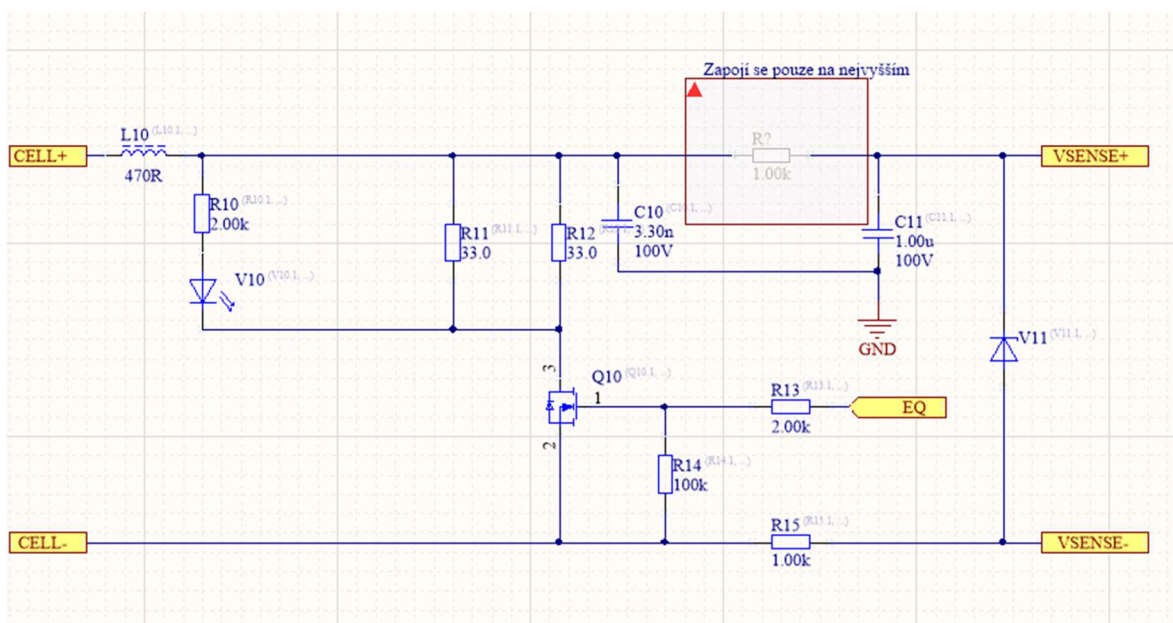
4 Návrh hardwaru systému pro správu baterií

Tato část práce je zaměřena na návrh elektrického schématu. Celá část bude rozdělena do čtyř bloků:

- Balancování článků – Skládá se z výkonových rezistorů, spínacího prvku a filtrů
- Napájení – návrh lineárního zdroje
- Řídící část – Skládá se z integrovaného obvodu pro BMS, a komunikační rozhraní
- Návrh desky plošných spojů

4.1 Návrh balančního obvodu

V této kapitole bude podrobně popisován Obrázek 16. Vybraný integrovaný obvod pro BMS je schopen balancovat maximálně 16 článků. Každý článek je připojen na balanční obvod přes kontakty CELL+ a CELL-. To odpovídá kladnému a zápornému pólu baterie. Jako vstupní ochranný prvek zde slouží EMI filtr, který je tvořen z feritové perly, která při frekvenci 100kHz vykazuje odpor 470 Ω .



Obrázek 16 Schéma balančního obvodu

Balanční část je tvořena výkonovým odporem a spínacího N-MOSFET tranzistoru. Balancovací proud byl zvolen 250mA. Tato hodnota vychází z požadavku na univerzálnost navrženého zařízení. Za předpokladu, že napětí mezi kontakty CELL+ a CELL- bude maximálně 4,2V a na tranzistoru typu MOSFET, nebude téměř žádný úbytek napětí (0,025V) lze z ohmova zákona dopočítat z rovnice (2).

$$R=U/I \quad (2)$$

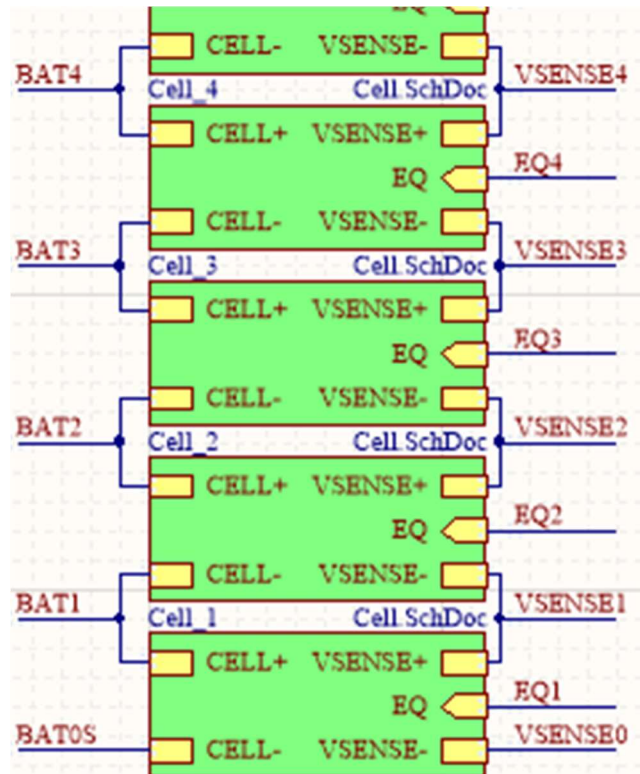
Hodnota odporu do navrženého zařízení je potom 16,8Ω. Dalším parametrem pro výběr odporu je jeho ztrátový výkon. Z rovnice (3) vychází ztrátový výkon cca 1W.

$$P=R \cdot I^2 \quad (3)$$

Aby nedocházelo k přetěžování jednoho 1wattového odporu, je vhodné tento výkon rozložit na více odporů. Pokud by byl výkon rozdělen do dvou odporů, byly by zatěžované pouze 0,5W, což by odpovídalo paralelní kombinaci 33,6 ohmových odporů. Nejbližší vhodný z řady je 33Ω.

Pro signalizaci aktivity balancování je zde použita LED dioda zelené barvy. Pro aktivování je nutné přivést na GATE napětí, a to před vstup EQ. V cestě je zařazen R13 pro omezení nabíjení parazitní kapacity tranzistoru. Pro sepnutí je nutné překonat hodnotu napětí $U_{GS}=2,5V$. Z datasheetu byla zjištěna hodnota napětí na EQ při EQ=1, která odpovídá 5,5V. Proud do GATE tranzistoru je téměř nulový, a tak úbytek napětí na odporu bude téměř zanedbatelný. Rezistor R14 zde slouží jako pull-down rezistor zajišťující rozepnutí tranzistoru při EQ=0.

Funkcí této výše popsané části schématu je po přivedení signálu EQ odebrat energii z článku a přeměňovat ji na teplo. Viz popis funkce pasivního balancování v kapitole 2.1.2. Další částí je filtr tvořen rezistorem R15, který je připojen z o úroveň vyšší zapojené části, jelikož pin CELL+ je společný s pinem CELL- z následujícího balančního obvodu (Obrázek 17)

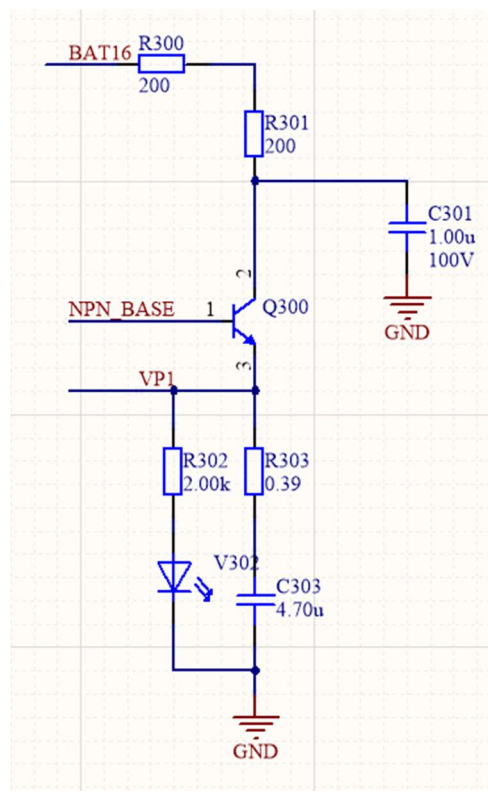


Obrázek 17 Propojení jednotlivých balančních obvodů

a kondenzátorem C10. Společně tvoří dolní propust s časovou konstantou 1ms, což odpovídá mezní frekvenci 159Hz. Při této frekvenci je útlum -3dB , a od této frekvence výše filtr začíná tlumit se sklonem -20dB/dekáda . Kondenzátor C11 je zde jako ochranný prvek při náhlých změnách napětí, které mohou nastat v případě odpojování a připojování baterií. Jako ochranný prvek pro integrovaný obvod v případě náhlého odpojení baterie je zde zenerova dioda s blokovacím napětím 6,2V. K tomu, aby nedošlo ke zničení diody nárazovým proudem, bude dioda využívat odpor R15 jako omezovač proudu.

4.2 Návrh řídicí a napájecí části

Jelikož se BMS systém nejčastěji umísťuje do battery packu, tak je obtížné zajišťovat napájení z vnějšku. Protože je elektronika BMS napájena z baterií, je nutné zajistit napájení pro obvod BQ... pomocí lineárního zdroje napětí (Obrázek 18). Pól nazvaný BAT16 se připojí na nejvyšší z měřených článků. Pól NPN_BASE je řídicí proud tekoucí přímo z IC do báze bipolárního NPN tranzistoru. Jako zpětná vazba pro NPN_BASE je výsledné napětí na pinu VP1. Pro kontrolu napájení je zde umístěna signalizační dioda V30. Aby nedocházelo k případnému rušení, nebo dokonce přepětí při připojování baterií, je zde umístěn filtrační kondenzátor C301. Pro vyhlazení výstupu je zde umístěn C303.



Obrázek 18 Schéma lineárního zdroje

Napětí VP1 s hodnotou 5,3V není zdaleka jediná napěťová hladina. V samotném IC jsou hned dva regulátory napětí. Jedná se o regulátor 10 V ALWAYS ON a regulátor 5 V ALWAYS ON (viz. Obrázek 19 **červená**). Tyto regulátory obstarávají napájení pro ultra úsporný IC. Pokud IC dostane příkaz z vnějšku ke sledování a balancování baterií, je nutný pro tento výkon sepnout výše popsany lineární zdroj napětí, protože výkon potřebný k vykonávání těchto úkonů je s ohledem na velikost IC příliš vysoký.

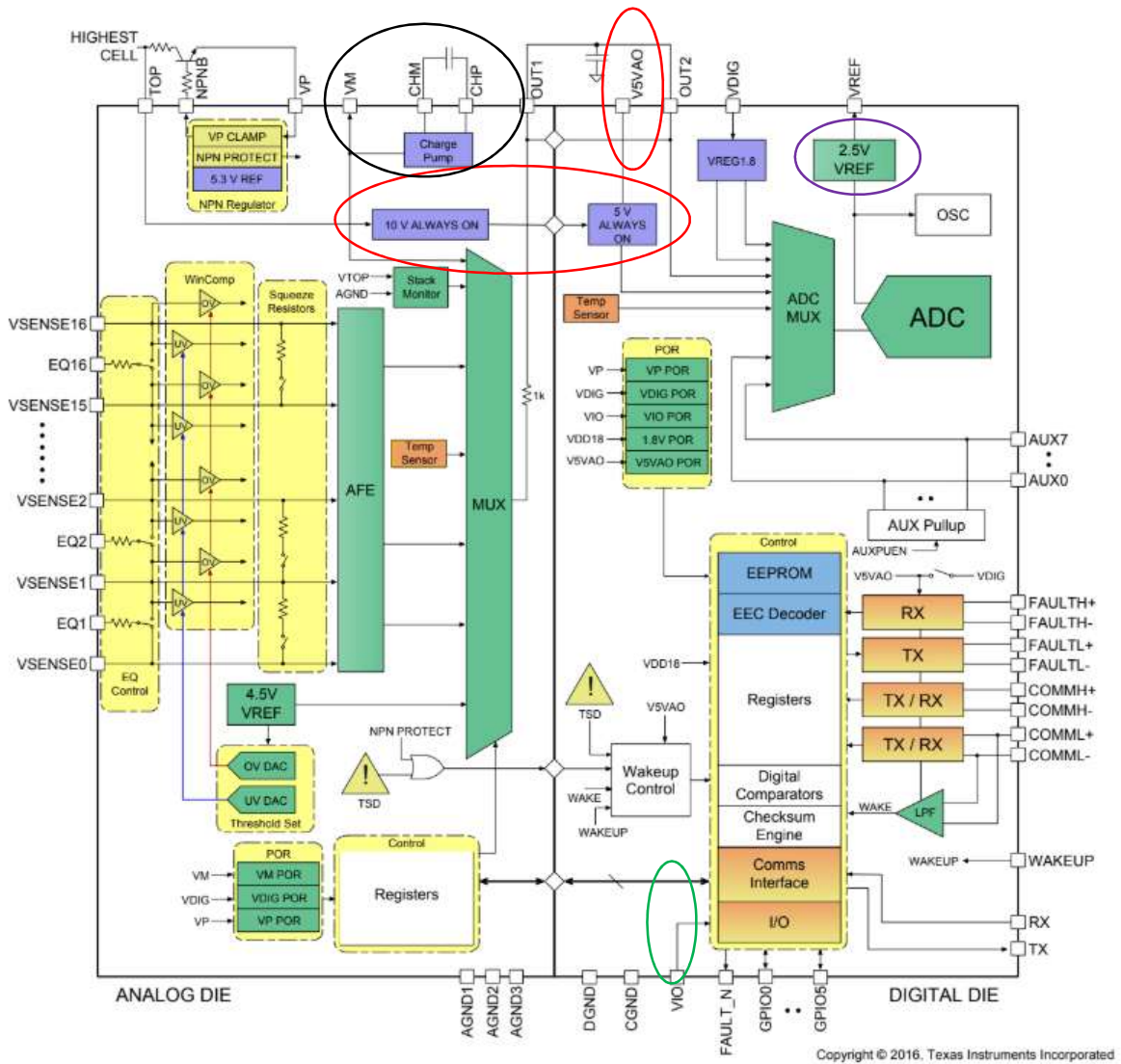
Další značně potřebnou napěťovou hladinou s hodnotou 2,5V je VREF (viz. Obrázek 19 **fialová**). Ta zde slouží pro převod analogové hodnoty napětí na digitální. Jako ochrana proti rušení jsou připojeny kondenzátory C307 a C308.

Pro napájení digitálních vstupů je zde pin VDIG, který je standardně připojen k VP1. K pinu VDIG jsou připojeny kondenzátory C314 a C315 sloužící nejen jako filtr ale také jako akumulátory energie v případě náhlé změny odběru IC. (viz. Obrázek 24)

Jako další napěťový výstup je zde napětí VM (viz. Obrázek 19 **černá**). Jedná se o výstup z nábojové pumpy s napětím -5V určené pro napájení vnitřních obvodů. Vývod je zde umístěn pro připojení odrušovacích kondenzátorů. K nábojové pumpě je nutno umístit mezi piny CHM a CHP kondenzátor C316 sloužící jako nosič náboje v případě přepínání nábojové pumpy.

Následuje napětí V5VAO (viz. Obrázek 19 **červená**). Jak již z názvu vyplývá, jedná se o napěťovou hladinu 5V. Výstup je zde umístěn pouze pro připojení odrušovacího kondenzátoru a pro nastavení reference pro komunikační piny COMML+ a FAULTL+.

Posledním napětím je VIO sloužící pro komunikační logickou část s dalším procesorem (viz. Obrázek 19 zelená). Standardně se připojuje k napětí VP1. Pokud bychom však propojovali IC k řídicímu procesoru, bylo by zapotřebí připojit pin na napěťovou hladinu procesoru pro nastavení stejných referenčních hodnot a stejných logických úrovní.



Obrázek 19 Vnitřní struktura integrovaného obvodu [31]

4.3 Návrh řídicí části BMS

Tato část je zaměřena na hlavní část určenou pro balancování. Pro tuto část je vyhrazeno celkem 33 pinů. Pro spínání balančních tranzistorů je zde 16 EQ výstupů a pro diferenciální měření článků 17 pinů VSENSE. Jako ochrana proti přepětí (podpětí) mezi piny VSENSE16 a BAT16 jsou zde zařazeny antiparalelně dvě diody D303 a D304, které v případě rozdílu napětí většího než 0,7V sníží napětí na pinu VSENSE 16 napětí. Pro podobný případ jsou umístěny diody V305 a V306 mezi GND a VSENSE0. Ze zapojení vyplývá, že VSENSE0 je připojeno na GND a nikdy by neměl nastat stav, aby bylo rozdílné napětí. (viz. Obrázek 24)

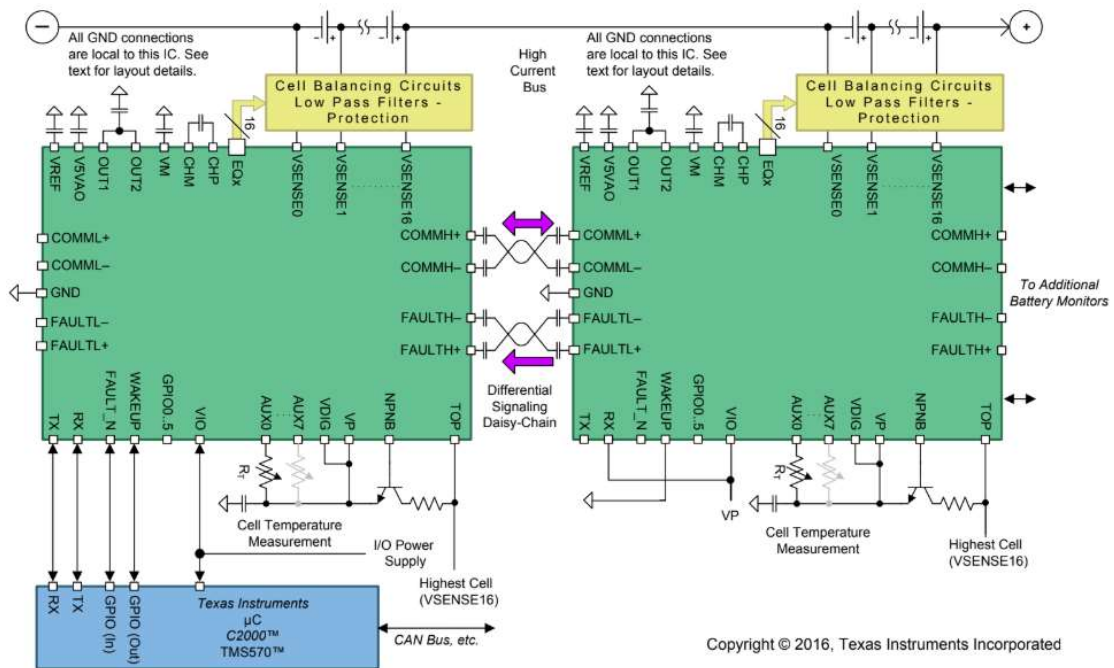
Aby bylo možné měřit každý z 16 článků, je používán analogový posuv úrovně (dále jen AFE). Díky tomu lze měřit každý z článků se stejnou přesností.

Signál z AFE je veden do multiplexeru, ze kterého je veden na výstup OUT1. Tento výstup je veden na OUT2, který následně vede do dalšího multiplexeru. Toto přemostění, nutné pro odfiltrování možného šumu, je vedeno přes kondenzátoru C304. Signál z druhého multiplexeru je veden do analogově – digitálního převodníku. Analogová hodnota je převedena ve 14 bitovém převodníku s postupnou aproximací na digitální hodnotu.

Převod trvá pouze 3,44 μ s, ale lze jej přenastavit na delší dobu, aby se stihl kondenzátor C304 ustálit. Tento průběh signálu je znázorněn v Obrázek 19

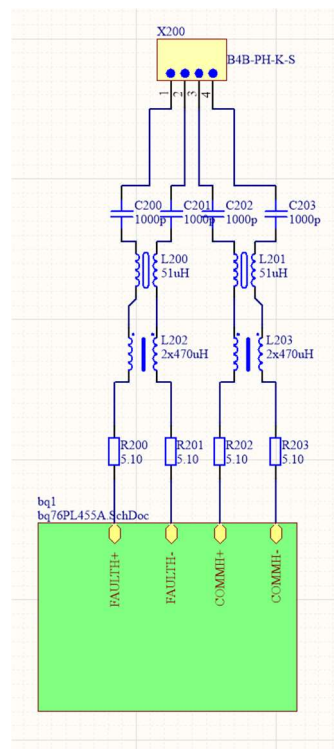
Pro komunikaci s dalšími segmenty BMS se používá kroucená dvoulinka z důvodu možného rušení komunikace. Pro indikování chyb je zde jednosměrná komunikační linka značená FAULT. Do segmentu s vyšším napětím se používá FAULTH a do segmentu s nižším napětím FAULTL. Tento kanál slouží pouze pro indikaci, nikoli pro ovládání a komunikaci. Pro tento účel slouží linka COMM. Zde je identicky použito COMMH a COMML (Obrázek 20). Z vnitřní struktury (Obrázek 19) je vidět, že signál pro probuzení nazvaný WAKEUP, je spojen s linkou COMML. Proto musí být hlavní komunikace

s procesorem připojena na segment s nejnižším napětím a s postupně se zvyšujícím napětím jsou „probouzeny“ další segmenty.



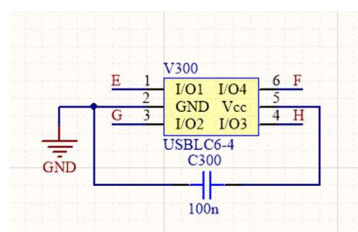
Obrázek 20 Schéma komunikace mezi segmenty [31]

Na Obrázek 21 je podrobně rozkreslena komunikace mezi obvody. Celá komunikace je galvanicky oddělena kondenzátory C200-C203 na napětí 1kV. Dále jsou zde zapojeny filtrační tlumivky pro odfiltrování soufázového rušivého proudu L202 a L203. Rušení je přeměněno na magnetický tok, který se ale vzájemně vyruší s druhým vodičem, a tak nebude signál nijak ovlivněn. Jako další filtr je zde umístěna common-mode filtrační cívka L200 a L2001, která pracuje obdobně jako feritová slza. S rostoucí frekvencí jí vzrůstá impedance a brání tak vysokofrekvenčnímu rušení. Naprosto symetricky by byla zapojena strana pro segment s nižším napětím.

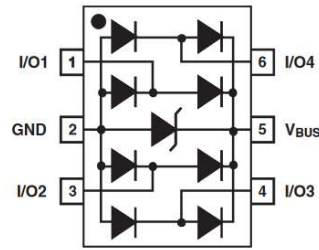


Obrázek 21 Podrobné schéma komunikace

Každý z komunikačních pinů je připojen přes TVS diodu V300 do GND. (Obrázek 22) Je zde také zařazen omezovací odpor R200 – R203. Toto zapojení slouží pro ochranu v případě elektrostatického napětí.

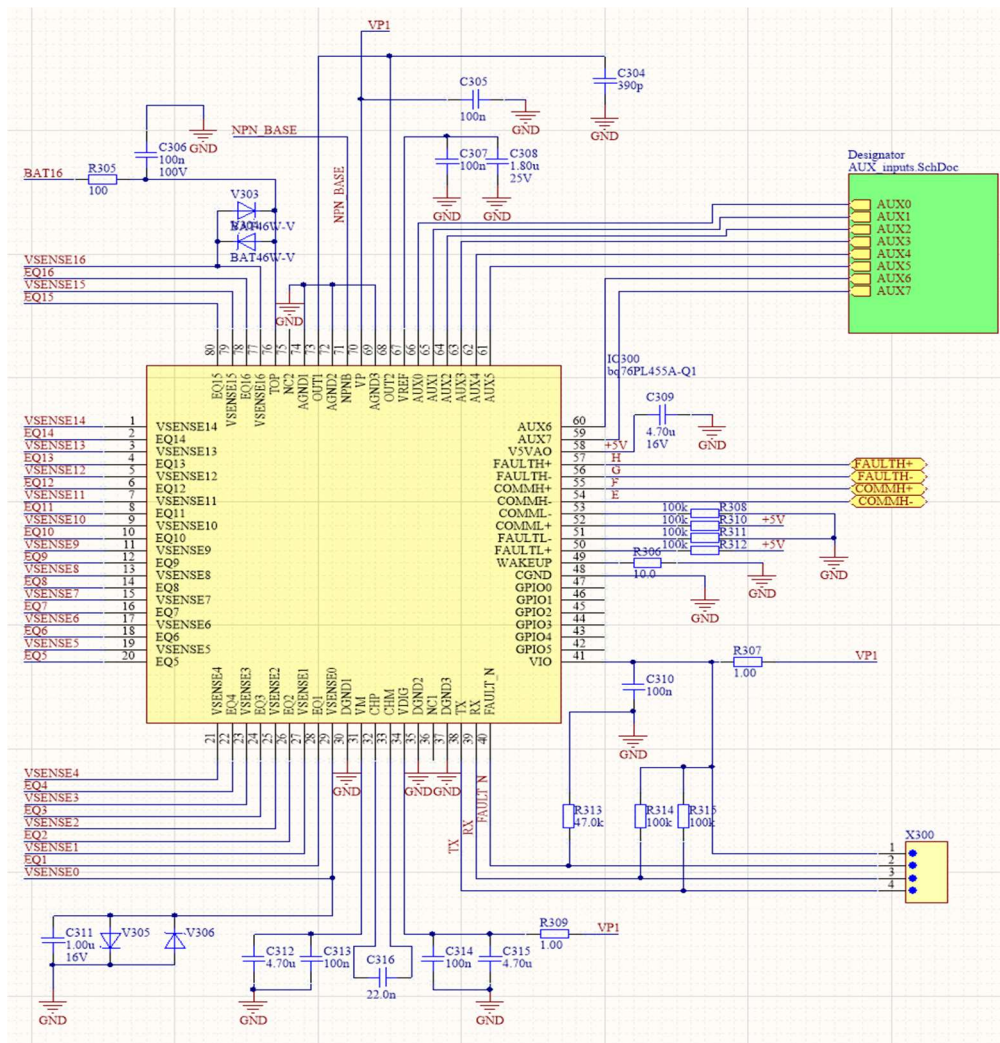


Obrázek 22 Schéma zapojení TVS diody



Obrázek 23 Vnitřní struktura TVS diody

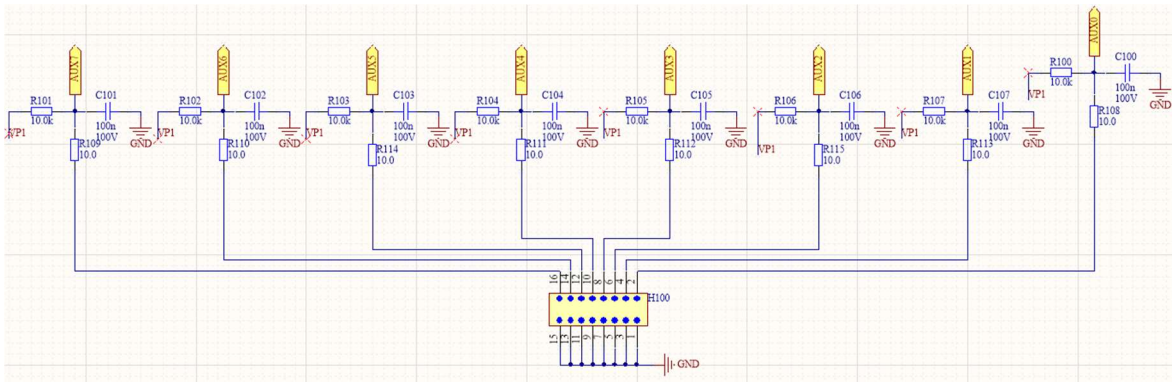
Označení vodičů E-H odpovídají přímo pinům COMMH+(-) a FAULT+(-) (Obrázek 24).



Obrázek 24 Schéma zapojení BMS jednotky

4.4 Návrh obvodu pro měření teploty

Aby nedocházelo k přehřívání baterií, je nutné monitorovat teplotu baterií. Sám IC je schopen monitorovat teploty přes vstupy AUX0 – AUX7.



Obrázek 25 Schéma zapojení analogových vstupů pro měření teploty

Ochranu proti rušení zprostředkovává opět dolní propust, která je na stejné mezní frekvenci 159Hz. Je tvořena odporem R109 a kondenzátorem C101 (viz. Obrázek 25). Rezistor R101 zastupuje tzv. „pull-up“ rezistor, díky němuž je nastavována logická jednička. Tento rezistor se bude osazovat pouze v případě, kdy nebude využit pin AUX pro měření teploty.

Pokud by byla potřeba měřit teploty, bylo by zapotřebí zajistit z lineárního zdroje napětí, stabilizované napětí 5V. K tomuto napětí by byl připojen termistor, který by s dalším

rezistorem fungoval jako dělič napětí, přičemž by hodnota napětí kolísala od 0V do 5V v závislosti na teplotě.

V případě, že by bylo za potřebí použití více teplotních snímačů, lze použít GPIO piny, za které lze zařadit multiplexery, které by byli schopné měřit i několik desítek teplot.

4.5 Návrh desky plošných spojů

Pro návrh desky plošných spojů (dále jen DPS) byl použit program Altium Designer. Rozměr desky plošných spojů byl vybrán 150x60mm, což by přibližně odpovídalo rozměrům akumulátoru pro elektrickou formuli, která byla hlavním adeptem na případné balancování článků. Rozměr aku-packu vyplývá z pravidel FSE (Formula Student Electric). Podrobné rozkreslení jednotlivých vrstev je znázorněno v přílohách.

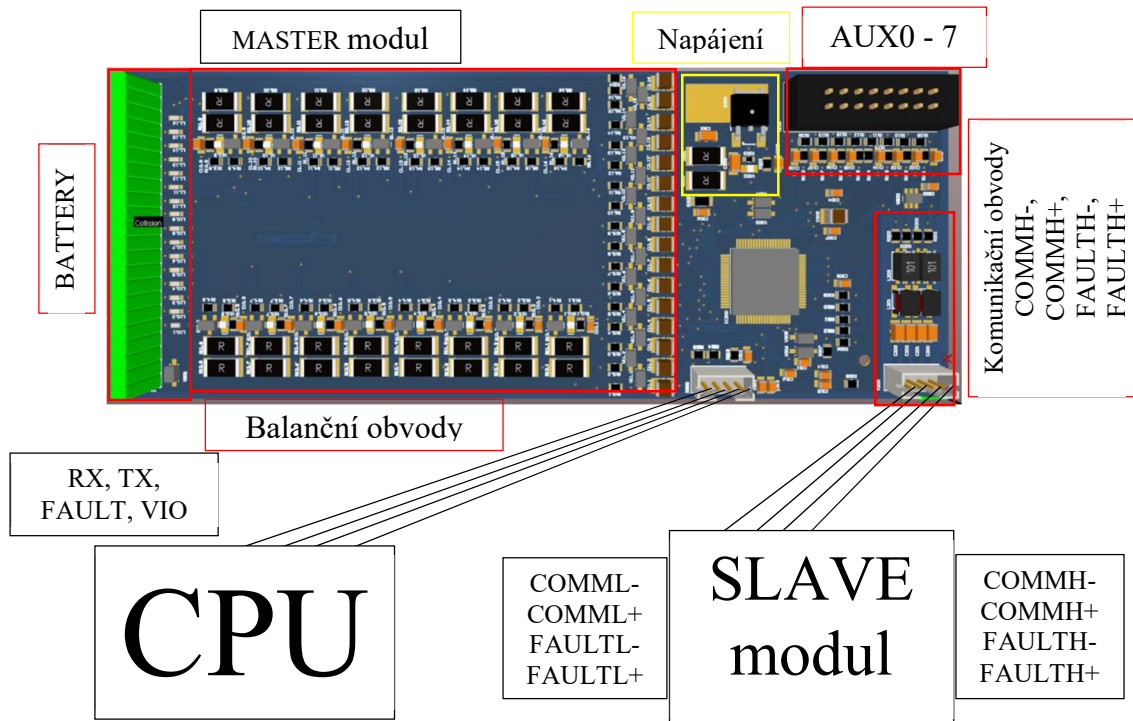
5 BMS modul

Aby bylo možné komunikovat a řídit BMS modul, je zapotřebí příslušného mikropočítače, který obstará nastavení jednotlivých parametrů BMS modulu a možnost exportu dat pro vnější vyhodnocení do PC

V levé části na Obrázek 26 je konektor pro připojení 16 monitorovaných článků. Vpravo od konektoru se nachází výkonová část balančních obvodů. Zde jsou názorně vidět výkonové odpory. V horní části mezi balančními obvody a AUX se nachází napájecí část. Je vidět, že řídicí tranzistor má pro lepší odvod tepla vytvořen chladič PAD. Jak již bylo výše zmíněno, modul potřebuje řízení. Pro tuto komunikaci je zde konektor obshující řídicí piny (RX, TX, FAULT, V_{IO}).

Pro komunikace s dalšími moduly je zde komunikace nazývána Daisy-Chain. Ta se nachází na Obrázek 26 na MASTER modulu vpravo dole. Z MASTER modulu vedou dva páry kroucené dvoulinky do SLAVE modulu, kde se připojují na komunikační obvody značené (COMML+(-) a FAULTL+(-)). Pokud by bylo potřeba další rozšíření, SLAVE

modul má své vlastní komunikační obvody pro další SLAVE modul, který by se připojil analogicky na (COMMH+(-) a FAULTH+(-)), atd.



Obrázek 26 Uspořádání BMS modulu

Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout, zrealizovat a otestovat univerzální systém řízení baterií, který slouží k ochraně článků a k prodloužení jejich životnosti.

V první části byly porovnány nejrozšířenější druhy baterií. Byly zohledňovány způsoby nabíjení a ukončování nabíjení. Dále byly popsány jejich vlastnosti ohledně proudové zatížitelnosti a také jejich vlivy na životní prostředí. Aby bylo možné vybrat vhodný způsob pro hlídání a řízení stavu baterií, bylo potřeba seznámit se s průběhy nabíjení a s limity, které je nutno brát v úvahu při navrhování BMS.

Další část byla zaměřena na způsoby balancování a vybrání vhodného integrovaného obvodu pro BMS. Vybráno bylo na základě možnosti sledování více teplot a vyšší přesnosti integrovaného obvodu od firmy Texas Instruments. Pro regulování hladin baterií bylo vybráno pasivní balancování z důvodu jednoduchosti realizace.

Samotný návrh systému je popsán v poslední části. Práce byla zaměřena na návrh obvodu pro balancování jednotlivých článků, obvodů pro komunikaci a napájecích obvodů.

Využití této práce je cíleno do projektu elektrické formule „Formula Student Electric“. Zaměření bylo tedy na optimalizaci pro tuto aplikaci. V tuto chvíli však nejsou známy zástavbové rozměry elektroniky do aku-packu, proto nebyla zatím deska finálně postavena a otestována. Do budoucna bych se rád touto problematikou dále zabýval a dovedl tuto práci do zdárného konce. Pro aplikaci do elektrické formule by bylo potřeba navrhnout multiplexery sloužící pro měření většího počtu teplot v akupaku.

Seznam literatury a informačních zdrojů

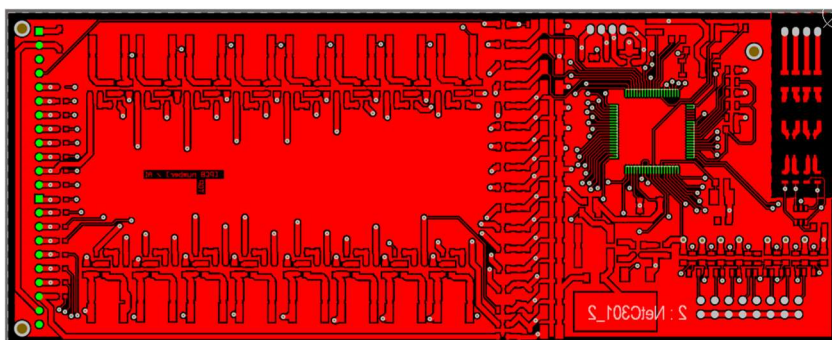
- [1] Informace | battery.cz. Autobaterie, motobaterie, akumulátory a články všeho druhu | battery.cz [online]. Copyright © 2012 [cit. 23.04.2019]. Dostupné z: <https://www.battery.cz/informace/>
- [2] Inteligentní řízení baterií pro průmyslové aplikace. In: *DPS elektronika od A do Z* [online]. ©2019, 3/2015 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/soucastky/id:24793/inteligentni-rizeni-baterii-pro-prumyslove-aplikace>
- [3] Strukturální řez NiCd akumulátoru. In: *BB7* [online]. ©2019 [cit. 2019-06-03]. Dostupné z: <https://www.bb7.com/2017/06/07/aggravated-batteries-part-ii/>
- [4] Základní charakteristiky | NiCd akumulátory | Abeceda baterií a akumulátorů [online]. Copyright © 2009 [cit. 10.04.2019]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nicd-akumulatory/zakladni-charakteristiky>
- [5] BATTEX. Základní charakteristiky NiCd: Abeceda baterií a akumulátorů. In: *Battex* [online]. -: -, ©2009-2019 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nicd-akumulatory/zakladni-charakteristiky>
- [6] BATTEX. Nabíjení hermetických NiCd akumulátorů. In: *Battex* [online]. -: -, ©2009-2019 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatory/nabijeni-hermetickych-nicd-akumulatory>
- [7] BATTEX. Časová metoda: Abeceda baterií a akumulátorů. In: *Battex* [online]. -: -, ©2009-2019 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatory/nabijeni-hermetickych-nicd-akumulatory/ukonceni-casove>
- [8] BATTEX. Metoda „V_{CO}“: Abeceda baterií a akumulátorů. In: *Battex* [online]. ©2009-2019 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatory/nabijeni-hermetickych-nicd-akumulatory/ukonceni-napetove/metoda-vco>
- [9] BATTEX. Metoda „PKV“: Abeceda baterií a akumulátorů. In: *Battex* [online]. ©2009-2019 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatory/nabijeni-hermetickych-nicd-akumulatory/ukonceni-napetove/metoda-pkv>
- [10] BATTEX. Metoda „-ΔV“: Abeceda baterií a akumulátorů. In: *Battex* [online]. ©2009-2019 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatory/nabijeni-hermetickych-nicd-akumulatory/ukonceni-napetove/metoda-delta-v>
- [11] BATTEX. Metoda „d²V/dt²“: Abeceda baterií a akumulátorů. In: *Battex* [online]. ©2009-2019 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatory/nabijeni-hermetickych-nicd-akumulatory/ukonceni-napetove/metoda-d-v-dt>
- [12] BATTEX. Ukončení teplotní: Abeceda baterií a akumulátorů. In: *Battex* [online]. ©2009-2019 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatory/nabijeni-hermetickych-nicd-akumulatory/ukonceni-teplotni>

- [13] BATTEX. Metoda „TCO“: Abeceda baterií a akumulátorů. In: *Battex* [online]. ©2009-2019 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatoru/nabijeni-hermetickych-nicd-akumulatoru/ukonceni-teplotni/metoda-tco>
- [14] BATTEX. Metoda „ $\Delta T/\Delta t$ “: Abeceda baterií a akumulátorů. In: *Battex* [online]. ©2009-2019 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatoru/nabijeni-hermetickych-nicd-akumulatoru/ukonceni-teplotni/metoda-dT/dt>
- [15] BATTEX. Ukončení proudové: Abeceda baterií a akumulátorů. In: *Battex* [online]. ©2009-2019 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatoru/nabijeni-hermetickych-nicd-akumulatoru/ukonceni-proudove>
- [16] NiMH baterie. In: *Alibaba.com* [online]. -: -, ©1999-2019 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: https://www.alibaba.com/product-detail/4-8v-1500mah-aa-nimh_60701761183.html
- [17] Základní charakteristiky NiMH: Abeceda baterií a akumulátorů. *Battex* [online]. ©2009-2019 [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nimh-akumulatory/zakladni-charakteristiky>
- [18] BATTEX. Nabíjení hermetických NiMH akumulátorů: Abeceda baterií a akumulátorů In: *Battex* [online]. ©2009-2019 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatoru/nabijeni-hermetickych-nimh-akumulatoru>
- [19] BATTEX. Základní charakteristiky Li akumulátorů: Abeceda baterií a akumulátorů. In: *Battex* [online]. ©2009-2019 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/li-akumulatory/zakladni-charakteristiky>
- [20] Lithium-iontový akumulátor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-iontov%C3%BD_akumul%C3%A1tor
- [21] BATTEX. Nabíjení Lithiových článků: Abeceda baterií a akumulátorů. In: *Battex* [online]. ©2009-2019 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nabijeni-hermetickych-akumulatoru/nabijeni-lithiovych-akumulatoru>
- [22] LiFePo4 článek. In: *Avacom s.r.o.* [online]. ©1997-2019 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: https://www.avacom.cz/lithium-cell-lifepo4-32v-20ah?gclid=Cj0KCQjwrjdjBRDXARIsAEcE5YnS3Sepb7zte-_PEbQNUF7tN6332y4aqz1DjWsIgcSiEJ8nBip-qO4aAvOfEALw_wcB
- [23] LiFePo4 článek. In: *Ostrovni fotovoltaické elektrárny* [online]. -: -, - [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: http://www.ostrovni-elektrarny.cz/index.php?category=baterie-lifepo4&detail=MzAwMDEw&detail_name=baterie-clanek-lifepo4-3-2v-40ah
- [24] Panasonic Li-ion 18650. In: *Rotorama s.r.o.* [online]. [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <https://www.rotorama.cz/baterie/panasonic-li-ion-18650>

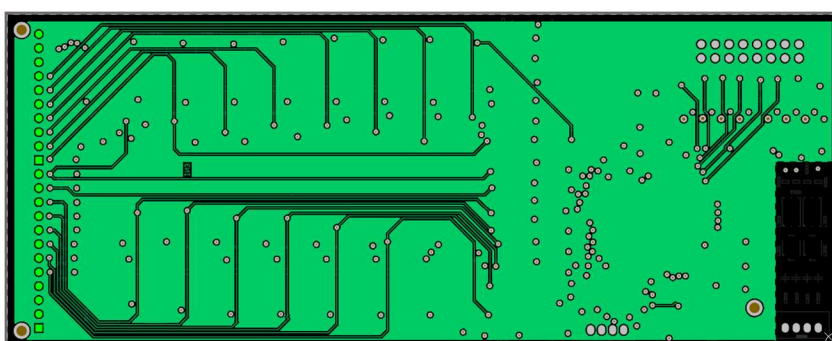
- [25] BATTEX. Lithium-iontový akumulátor: Abeceda baterií a akumulátorů. In: *Battex* [online]. ©2009-2019 [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/li-akumulatory/valcove-lithiove-akumulatorove-clanky/rozdeleni-podle-pouziti-valcovych-li-aku/jmenovite-napeti-3-6-v>
- [26] Battery management system. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Battery_management_system
- [27] How active and passive cell balancing works - Fully Charged - Archives - TI E2E Community. TI E2E Community [online]. Copyright © Copyright 1995 [cit. 28.04.2019]. Dostupné z: http://e2e.ti.com/blogs_/archives/b/fullycharged/archive/2016/10/05/how-active-and-passive-cell-balancing-works
- [28] Battery balancing. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Battery_balancing
- [29] RICHTER, Michal. *Návrh systému pro dohled a vyrovnávání dobíjení trakčního akumulátoru*. Praha, 2015. Diplomová práce. ČVUT Praha. Vedoucí práce Ing. Petr Laciga PhD, Poll s.r.o.
- [30] LTC6804 - Datasheet. *Mouser* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/609/680412fc-1271800.pdf>
- [31] Datasheet bq76pl455a-q1. *Texas Instruments* [online]. -: -, 2016, 3.11.2016 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/gpn/bq76pl455a-q1>

Přílohy

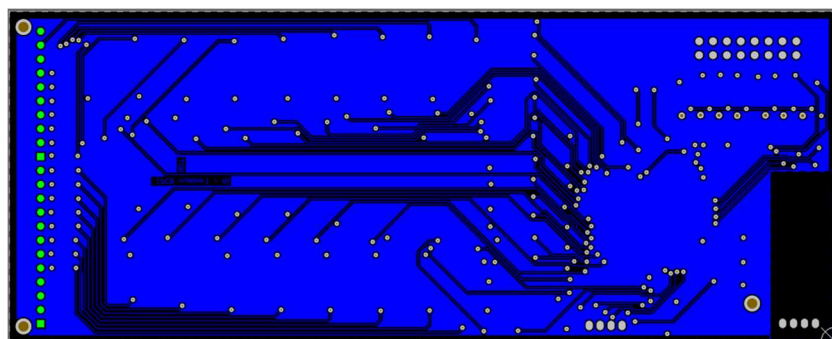
Příloha A



Obrázek 27 DPS Top Layer



Obrázek 28 DPS Middle Layer



Obrázek 29 DPS Bottom Layer