



ZÁPADOČESKÁ
UNIVERZITA
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

System správy Li-Ion baterií

Autor práce: Jiří Očenášek

Vedoucí práce: Ing. Bedřich Bednář

Plzeň 2018

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří OČENÁŠEK**

Osobní číslo: **E15B0232P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**

Název tématu: **Systém správy Li-Ion baterií - BMS**

Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

Student navrhne univerzální systém správy článků pro Li-Ion baterie.

1. Shrnutí druhů technologií nabíjecích baterií.
2. Zhodnotit a vybrat integrovaný obvod vhodný pro balancování Li-Ion bateriových článků - BMS.
3. Návrh schématu elektrického obvodu a desky plošného spoje v programu Altium Designer.
4. Sestavení funkčního obvodu a jeho oživení.
5. Naprogramování systému správy Li-Ion baterií do navrhnuté a realizované elektroniky a implementace CAN sběrnice.

Navrhnutý systém bude sloužit pro baterie využívané v prototypových elektrických vozidlech na katedře KEV a pro výzkumné centrum RICE.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Bedřich Bednář


Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2018**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Tato práce se zabývá systémem správy článků pro Li-Ion baterie neboli BMS pro využití v prototypových elektrických vozidlech. Systém je navržen tak, aby byl schopen vyrovnávat hladiny napětí článků, což prodlužuje jejich životnost. Díky tomuto systému je také možné vyhnout se nechtěným vedlejším účinkům. Těmi jsou například snížení kapacity článků nebo jejich destrukce. Počet článků baterie, které je systém schopen spravovat je variabilní. Celé zařízení je založeno na SPI a UART komunikaci, přičemž jsou hodnoty napětí zobrazovány v grafické i číselné podobě v uživatelském rozhraní. První polovina práce se zabývá především rozdělením elektrochemických zdrojů (převážně akumulátorů) a shrnutím jejich vlastností nebo například nabíjením a vybíjením konkrétních typů akumulátorů. V další části je popsán princip BMS, jeho účel a veličiny, které lze s pomocí BMS získat. Poté je výčtem uvedeno několik možných variant BMS dostupných na trhu a kritéria, podle kterých je vybrána použitá varianta v této práci. Ve druhé polovině práce je popsáno zapojení a jednotlivé části zařízení BMS spolu s některými důležitými částmi obvodu měřicího modulu, jako je například A/D převodník, sériová komunikace a další. V poslední části práce je rozepsáno programové řešení měření článků spolu s jejich balancováním.

Klíčová slova

BMS, akumulátor, UART, SPI, balancování

Abstract

Očenášek, Jiří. *Battery management system for Li-Ion batteries* [*Systém správy Li-Ion baterií*]. Pilsen, 2018. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Bedřich Bednář

The main focus of this bachelor thesis is Battery Management System also known as BMS for Li-Ion batteries which is to be used with prototypes of electric vehicles. The system is designed to be able to level up voltage values of each cell, so negative side effects can be avoided and life of the batteries prolonged. Number of cells connected is not relevant as the system is to be universal. The whole device is based on SPI and UART serial communication whence measured cell voltages are displayed in user interface as gauges and numerical values. First half of the thesis is focused on electrochemical power sources (mostly accumulators) and summarizes characteristics of each type or charging and discharging methods. In following part, the BMS and its principals are described along with quantities obtainable by the BMS. Afterwards, some of the BMS solutions available on the market are listed with criteria which were followed while choosing the right solution for the project. In second half of the thesis each part of the system is described along with connection of the whole system. Also, few important circuits are also listed and their functions, for example A/D convertor, serial communication and more. In the last part of the thesis a programming solution for measuring cell voltages and balancing of cells is wrote down.

Keywords

BMS, accumulator, UART, SPI, balancing

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

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

V Plzni dne 29. května 2018

Jiří Očenášek

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Bedřichu Bednářovi za vstřícné vedení práce. Poděkování také patří panu Ing. Košanovi Ph.D. a to především za konzultace v oblasti sériové komunikace, které zajistily dokončení stěžejní části práce.

Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Seznam symbolů a zkratk	x
Úvod	1
1 Ukládání elektrické energie	2
1.1 Elektrochemické zdroje	2
1.2 Akumulátory	3
1.2.1 Akumulátory s kyselým elektrolytem	3
1.2.2 Alkalické akumulátory	4
1.3 Vlastnosti olověných akumulátorů	4
1.3.1 Nabíjení olověných akumulátorů	4
1.3.2 Vybíjení olověných akumulátorů	5
1.4 Vlastnosti Ni-Cd a Ni-MH akumulátorů	5
1.4.1 Nabíjení Ni-Cd a Ni-MH akumulátorů	7
1.4.2 Vybíjení Ni-Cd a Ni-MH akumulátorů	9
1.5 Vlastnosti Li-Ion akumulátorů	10
1.5.1 Nabíjení Li-Ion akumulátorů	10
1.5.2 Vybíjení Li-Ion akumulátorů	11
1.5.2.1 Podoby Li-Ion akumulátorů	12
1.6 Negativní vlivy na akumulátory	12
1.7 Nejběžnější druhy zapojení článků	14
2 Battery Management System	16
2.1 Odhad veličin	16
2.1.1 Odhad stavu nabití baterie	17
2.1.1.1 Přímé metody odhadu stavu nabití	17
2.1.1.2 Nepřímé metody odhadu stavu nabití	17
2.1.2 Odhad zdraví baterie	17
2.1.3 Odhad stavu života baterie	18

2.2	Balancování bateriových článků	18
2.2.1	Princip balancování článků	18
2.3	Tržní dostupnost BMS	20
2.3.1	BMS24T	20
2.3.2	Mk3x12	21
2.3.3	123SmartBMS	21
2.3.4	LTC6804-1	22
2.4	Výběr BMS obvodu	23
3	Návrh monitorovacího zařízení	24
3.1	Zapojení zařízení pro správu baterií	24
3.1.1	A/D převodník	26
3.1.2	Sériové periferní rozhraní - SPI	27
3.1.2.1	Časování sériové komunikace	28
3.1.3	Asynchronní přenos UART	29
3.2	První oživení zařízení pro správu BMS	29
3.3	Zapojení s méně než 12 články	31
4	Realizace programu pro měření napětí článků a balancování	33
4.1	Zápis konfigurace a čtení konfigurace	33
4.1.1	Packet error kód - PEC	34
4.2	Konverze napětí článků na vstupech	34
4.2.1	Příznakové bity hodnoty napětí na článku	35
4.2.1.1	Nabíjecí obvody pro akumulátory	36
4.3	Sériová komunikace	36
4.3.1	Uživatelské rozhraní	37
4.3.2	Balancování článků akumulátoru	37
	Závěr	39
	Reference, použitá literatura	40
	Přílohy	43
A	Schémat zapojení	43
A.1	DC1894B	43

Seznam obrázků

1.1	Přeměna energie sekundárního článku Převzato z [2] 	3
1.2	Ilustrační obrázek oloveného akumulátoru Převzato z [27] 	4
1.3	Nabíjecí charakteristika oloveného článku PS-1265 při nabíjení konstantním napětím s omezením proudu Převzato z [6] 	5
1.4	Ilustrační obrázek Ni-Cd článku Převzato z [28] 	6
1.5	Ilustrační obrázek Ni-MH článku Převzato z [29] 	6
1.6	Nabíjecí charakteristika Ni-Cd a Ni-MH článku konstantním proudem Převzato z [6]	7
1.7	Teplotní charakteristika Ni-Cd a Ni-MH článku při nabíjení jednonásobkem kapacity článku a za teploty okolí 25°C Převzato z [6] 	8
1.8	Ukončení nabíjení na základě teploty (T), Napětí (V) nebo přírůstku teploty (dT/dt) Převzato z [6] 	8
1.9	Typická vybíjecí charakteristika Ni-Cd a Ni-MH článků Převzato z [6] 	9
1.10	Ilustrační obrázek Li-Ion článku Převzato z [30] 	10
1.11	Nabíjecí charakteristika Li-Ion akumulátorů Převzato z [3] 	11
1.12	Vybíjecí charakteristika Li-Ion akumulátorů Převzato z [3] 	12
1.13	Porovnání vlivu teploty na Ni-Cd akumulátor a Pb akumulátor Převzato z [3]	13
1.14	Porovnání vlivu teploty na Li-ion akumulátor při různých hladinách nabití Převzato z [8] 	13
1.15	Paralelně sériové zapojení (vlevo) a sérioparalelní (vpravo) Převzato z [5] . . .	15
2.1	Princip pasivního balancování Převzato z [18] 	19
2.2	Jednoduché balancování na základě napětí. V_{OV} - detekční hranice přebití, ΔV_{OVH} - pásmo necitlivosti detekce přebití. Převzato z [16] 	19
2.3	Systém pro správu baterií BMS24T Převzato z [13] 	20
2.4	Systém pro správu baterií Mk3x12 Převzato z [31] 	21
2.5	Systém pro správu baterií 123BMS Převzato z [32] 	22
2.6	Již zhotovená deska plošných spojů DC1894B s obvodem LTC6804-1 Převzato z [20]	23
3.1	4-vodičové zapojení SPI Převzato z [17] 	24
3.2	Blokové schéma zařízení pro správu BMS Převzato z [17] 	25
3.3	Blokové schéma zapojení článků s A/D převodníky a multiplexery Převzato z [17]	25
3.4	Schéma zapojení s rezistoy pro testování Převzato z [17] 	26

3.5	SPI komunikace s vícem SLAVEů Převzato z [22] 	28
3.6	SPI komunikace způsobem daisy-chain Převzato z [22] 	28
3.7	Diagram pracovních stavů LTC6804 (vlevo) a isoSPI portu (vpravo) Převzato z [17]	29
3.8	isoSPI komunikace se třemi DC1942B obvody (vlevo), DC2026C (vpravo dole) a mikrokontrolér Převzato z [23] 	30
3.9	Ukázka GUI využívané programem QuickEval od Linear Technology Převzato z [20]	31
3.10	Zapojení s méně než 12 články Převzato z [17] 	32
4.1	Časování pro ADCV příkaz při měření všech 12 článků Převzato z [17] 	35
4.2	Doby konverze pro ADCV příkaz při měření všech 12 článků Převzato z [17]	35
4.3	Schéma obvodu LM3620 Převzato z [25] 	36
4.4	Uživatelské rozhraní pro vizualizaci napětí článků	37
4.5	Blokové schéma navrženého balancování článků	38
A.1	Schéma zapojení obvodu DC1894B Převzato z [20] 	44

Seznam tabulek

1.1	Vybíjecí a nabíjecí napětí Li-Ion akumulátorů Převzato z [6] 	12
-----	--	----

Seznam symbolů a zkratek

BMS	Battery Management System. Systém pro správu baterií.
C	Kapacita. [mF]
CLK	Clock. Hodinové impulsy.
CPU	Central Processing Unit. Centrální výpočetní jednotka (processor).
CS	Chip Select.
GND	Ground. Zemnicí vodič.
GUI	Guided Interface. Uživatelské rozhraní.
I	Electrical Current. Elektrický proud. [A]
$isoSPI$	Isolated Serial Peripheral Interface. Izolovaná sériová periferální komunikace.
Kč	Czech Crown. Koruna česká.
$MISO$	Master In, Slave Out.
$MOSI$	Master Out, Slave In.
PC	Personal Computer. Osobní počítač.
PEC	Packed Error Code.
pH	Potential of Hydrogen. Vodíkový exponent.
SDI	Serial Data In. Vstup sériových dat.
SDO	Serial Data Out. Výstup sériových dat.
SoC	State of Charge. Stav nabití baterie. [Ah]
SPI	Serial Peripheral Interface. Sériová periferální komunikace.
SS	Slave Select.
T	Temperature. Teplota. [$^{\circ}C$]
t	Time. Čas. [s]
U, V	Electrical Voltage. Elektrické napětí. [V]
$UART$	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter. Univerzální asynchronní přijímač a vysílač.
W_c	Work. Práce vykonaná elektrostatickými silami. [J]
$\frac{dT}{dt}$	Derivace teploty podle času.
$\frac{\Delta U}{dt}$	Přírůstek napětí za čas. $\left[\frac{V}{s}\right]$
ΔT	Přírůstek teploty. [$^{\circ}C$]

η The Colombic Efficiency. Coulombická účinnost. [%]
 τ Time Constant. Časová konstanta. [s]

Úvod

Dnešní doba se nese ve znamení rozvoje elektromobility. Mimo drobnou elektroniku a přenosné počítače se můžeme setkat s rozmachem vývoje v oblasti elektrokol, elektrokoloběžek a především elektromobilů. V současné době se elektromobilita uplatňuje i v hromadné dopravě. Všechna tato zařízení mají jedno společné, a tím je zdroj energie v podobě akumulátorů. Zde vyvstává relativně široká problematika zabývající se péčí o tyto zdroje. Baterie skládající se ze spojení jednotlivých akumulátorů musí být řádně regulována. Zejména pak v dodržování stanovených hladin napětí článků, jejichž nedodržení vede k razantnímu zkrácení životnosti, ba dokonce i k jejich trvalému poškození, přičemž se články stávají nepoužitelnými. Pro dodržení těchto hladin je potřeba řešení, kterým bude zajištěno, že hladiny napětí článků budou pouze velmi nepatrně rozdílné. Těmito faktory a mnohými dalšími se zabývá systém pro správu baterií (BMS).

Cílem práce je navrhnout systém, který bude Li-Ion akumulátory spravovat a zajišťovat tak péči v podobě právě BMS. To spočívá především v měření článků a jejich balancování v povoleném napěťovém rozmezí, aby nebylo překročeno ani jedno z referenčních napětí udaných výrobcem. Klíčovým požadavkem na navržené zařízení je univerzální použitelnost na široké spektrum aplikací. Počet balancovaných článků se může pohybovat od několika jednotek článků (elektrokoloběžka) až po stovky článků (elektromobil). Zařízení bude schopné komunikovat s počítačem na základě sériové komunikace a vizualizovat daná napětí jednotlivých článků včetně jejich číselných hodnot. Zařízení bude pracovat samostatně, avšak je velmi rázně doporučeno použít pro akumulátory nabíjecí obvody disponující například proudovým omezením a dalšími funkcemi.

1

Ukládání elektrické energie

Dle zdroje [2] rozdělujeme akumulaci elektrické energie na akumulaci:

- a) přímou,
- b) nepřímou.

Přímou akumulací se rozumí ukládání energie, která je akumulována v kondenzátoru. Během procesu nabíjení a vybíjení dochází u kondenzátoru k pohybu náboje v elektrickém poli, přičemž je vykonávána práce v podobě elektrostatické síly. Jak popisuje rovnice 1.1, práce je úměrná kapacitě a kvadrátu napětí. [1]

$$W_c = \frac{C \cdot U^2}{2} \quad [J; mF, V] \quad (1.1)$$

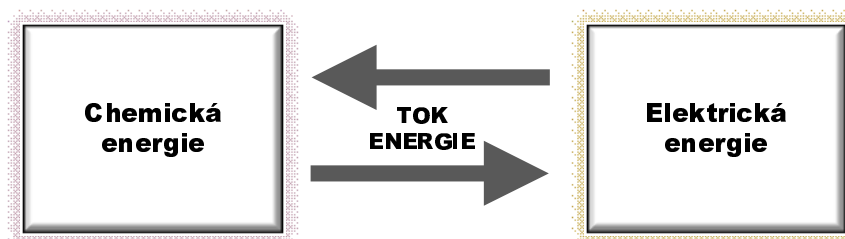
Nepřímá akumulace je charakteristická tím, že při ní dochází k převedení elektrické formy energie na energii formy jiné. Tento druh akumulace je využíván například v gravitačních systémech přečerpávacích elektráren nebo v rámci ukládání energie do stlačeného vzduchu v tlakových nádobách. Důvod použití nepřímé akumulace spočívá především v množství akumulované energie, kdy jsme schopni akumulovat až stovky MWh, naproti tomu přímou akumulací lze akumulovat maximálně jednotky kWh. [3]

1.1 Elektrochemické zdroje

Do nepřímé akumulace řadíme tzv. „elektrochemické zdroje“. Ty lze rozdělit na:

- a) primární články,
- b) sekundární články.

Pro účely této práce se budeme věnovat sekundárním článkům, neboť umožňují přeměnu energie jak z chemické na elektrickou, tak naopak. Sekundární články lze tedy dobít a obnovit v nich tak náboj. Oproti tomu primární články jsou po vybití nepoužitelné a stává se z nich pouze odpad. Vzhledem k malému napětí článku jako jednotky, bývají články běžně spojovány do jednoho celku (více v sekci 1.7). [3]



Obr. 1.1: Přeměna energie sekundárního článku |Převzato z [2]|

1.2 Akumulátory

Termín akumulátor je používán ve spojitosti s funkcí zásobování elektrické energie, kdy je účelem dodat energii do akumulátoru a obnovit v něm tak náboj, přičemž naakumulovaná energie je následně při vybíjení odebírána zátěží, což je umožněno chemickými změnami uvnitř akumulátoru a doprovázeno rozdílným elektrochemickým potenciálem elektrod. Pro přeměnu energie z chemické na elektrickou je potřeba spojení elektrod uvnitř akumulátoru pomocí elektrolytu. Jedná se o proces galvanizace. Kromě dělení na akumulátory otevřené a hermeticky uzavřené, lze akumulátory rozdělit podle charakteru elektrolytu na základě pH faktoru, a to na:

- a) s kyselým elektrolytem,
- b) se zásaditým elektrolytem.

Pro správné nabití akumulátoru je třeba uvažovat to, že napětí zdroje, který akumulátor nabíjí, musí být větší než vnitřní napětí akumulátoru, jelikož i nenabitý akumulátor vykazuje protinapětí. Zdroj [3] uvádí, že druh akumulátoru a jeho použití klade požadavky na vlastnosti a konstrukci nabíjecích zdrojů. Například pro zpravidla velké nikl-kadmiové akumulátory (dále jen Ni-Cd) je typické, že jednotlivé články mají napětí o velikosti násobku 1,2 V. Kapacita je pak běžně od desítek do stovek Ah. Pro malé akumulátory typu Ni-Cd, nikl-metalhydridové (dále jen Ni-MH) a lithium-iontové (Li-Ion) jsou často rozdíly napětí i mezi jednotlivými články, a proto se liší i způsob nabíjení. [3]

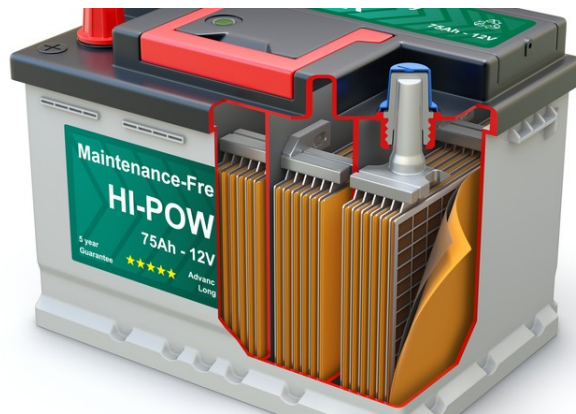
1.2.1 Akumulátory s kyselým elektrolytem

Tímto typem jsou akumulátory olověné. Jsou tvořeny olověnou mřížkou, přídavkem antimonu, vápníku nebo selenu a separátory. Elektrolytem je pak roztok kyseliny sírové H_2SO_4 . Dle zdroje [3] lze jako výhody vyzdvihnout nízký vnitřní odpor, vysokou energetickou účinnost, možnost provozu v náročnějších podmínkách (ve vozidle) a v dnešní době díky snížení podílu olova i přijatelnou hmotnost a nízkou cenu. Za problém bychom ale mohli považovat nízkou životnost. [3]

1.2.2 Alkalické akumulátory

Elektrolyt těchto akumulátorů je tvořen roztokem hydroxidu draselného KOH s dalšími přísadami (např. hydroxid lithný LiOH). Mezi tyto akumulátory patří například Ni-Cd akumulátory. Ty bývaly donedávna nejrozšířenější a nahrazovaly akumulátory nikelželezité (Ni-Fe) dříve používané pro větší kapacity. Tyto akumulátory však trpí velkým samovybíjením a vyšším vnitřním odporem. Dnes jsou postupně nahrazovány akumulátory lithiovými. Ni-Cd baterie je při stejné kapacitě zhruba o jednu třetinu těžší než baterie olověná. Lithiové akumulátory se dočkaly uvedení na trh především v souvislosti s rozvojem mobilních telefonů, avšak jejich vývoj je doprovázen řadou případů, kdy docházelo k výbuchu baterie vlivem nízkého bodu tání kovového lithia tvořícího zápornou elektrodu akumulátorů důsledkem zkratu způsobeným průnikem krystalů materiálu separátoru. Důsledkem bylo nahrazení materiálu záporné elektrody oxidem kobalitolithným ($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Co}_2\text{O}_3$) a kladné elektrody uhlíkem. Akumulátory tohoto typu jsou vyráběny s tekutým elektrolytem (lithium-iontové) a s pevným elektrolytem (lithium-iontové polymerové a lithium-polymerové). V současné době jsou lithiové akumulátory nejpoužívanější, a to především pro jejich vysokou hustotu energie vztaženou na objem. [2], [3], [4]

1.3 Vlastnosti olověných akumulátorů

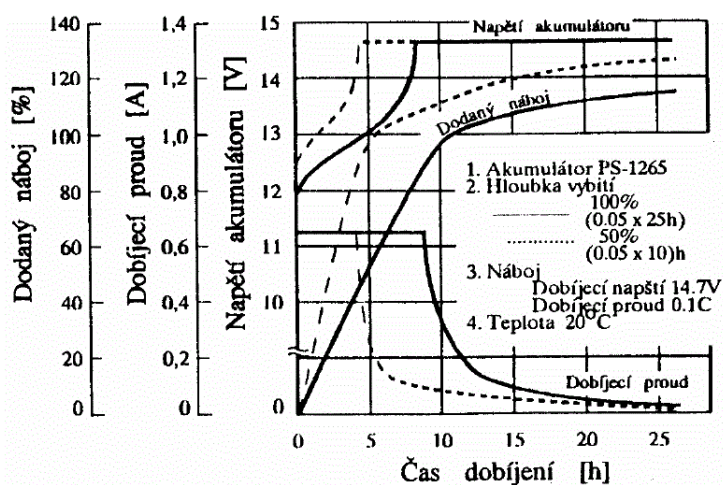


Obr. 1.2: Ilustrační obrázek olověného akumulátoru |Převzato z [27]|

1.3.1 Nabíjení olověných akumulátorů

Na obrázku 1.3 je uvedeno nabíjení akumulátoru v cyklickém režimu konstantním napětím s omezením proudu. Můžeme si všimnout, že při nabíjení článku narůstá napětí až do hodnoty 14,7 V. Do této hodnoty je uvolňováno malé množství plynů. Tato hodnota je podle zdroje [3] uváděna jako „hrana plynovacího napětí“. Po překročení této hrany nastává zvýšení produkce plynů spolu s nárůstem teploty. Pokud bychom v této fázi neomezili nabíjecí proud, došlo by ke ztrátě vody v elektrolytu. V tomto okamžiku je

v článku uloženo 60 - 80 procent dodaného náboje. Důsledkem omezení proudu dojde ke zpomalení ukládání energie až několikanásobně. Následně se článek nabíjí konstantním napětím a proud postupně klesá. [3], [6]



Obr. 1.3: Nabíjecí charakteristika olověného článku PS-1265 při nabíjení konstantním napětím s omezením proudu [Převzato z [6]]

1.3.2 Vybíjení olověných akumulátorů

Akumulátor se pro různé zatěžovací proudy chová různými způsoby. Pro větší vybíjecí proudy lze připustit menší zakončovací napětí, kdežto při malých zatěžovacích proudech je nutno dávat na konečné napětí pozor a včas při dosažení onoho napětí akumulátor odpojit. [3], [6]

1.4 Vlastnosti Ni-Cd a Ni-MH akumulátorů

Vzhledem k věkovému rozdílu mezi Ni-Cd a Ni-MH akumulátory, kdy u Ni-Cd článků během dvaceti let vývoje bylo relativně více času pro zdokonalování vlastností, mají Ni-MH články jisté výhody oproti svému niklkadmiovému protějšku. Například za stejných podmínek poskytují až o 40 procent větší kapacitu (viz 1.9). Další výhodou je menší podíl Cd, které je silně toxické a u Ni-Cd akumulátorů má zhruba 20 procentní podíl na hmotnosti článku. Dále Ni-MH akumulátory umožňují pracovat při vyšších teplotách, a to až o 15°C. Ni-MH akumulátory také nejsou postihovány paměťovým efektem jako Ni-Cd akumulátory. Paměťovému efektu je věnována část kapitoly 1.6.

Existuje ale mnoho faktorů, ve kterých Ni-MH zaostávají. Především je to způsobeno nedostatečnou dobou vývoje. Těmito faktory jsou například:

- Počet cyklů - Ni-Cd akumulátory jsou schopny vydržet za příznivých podmínek i 30 000 cyklů. Ni-MH oproti tomu nanejvýš 700.



Obr. 1.4: Ilustrační obrázek Ni-Cd článku [Převzato z [28]]

- Nelze použít proces rychlého nabití - vzhledem k nepatrnému poklesu napětí ($-\Delta U$) u Ni-MH článků při nabití na optimální úroveň je obtížné tento moment detekovat a je třeba použít složitější nabíjecí algoritmus (více v 1.4.1).
- Velikost vnitřního odporu - se zvyšováním kapacity, které je úměrné počtu aktivních prvků, roste také vnitřní odpor. Ten na základě Ohmova zákona omezuje vybíjecí proud. To se stává při vyšších kapacitách problémem, jelikož se v odporu mění energie na teplo, a jak je uvedeno dále, zahřívání akumulátorů má negativní vliv na životnost, stejně tak na celý proces nabíjení/vybíjení.
- Cena - jelikož pořizovací cena je jedním z rozhodujících faktorů při výběru akumulátoru, je třeba na ni v neposlední řadě nahlížet. Ni-MH akumulátory jsou až o polovinu dražší oproti Ni-Cd akumulátorům. [6], [3]

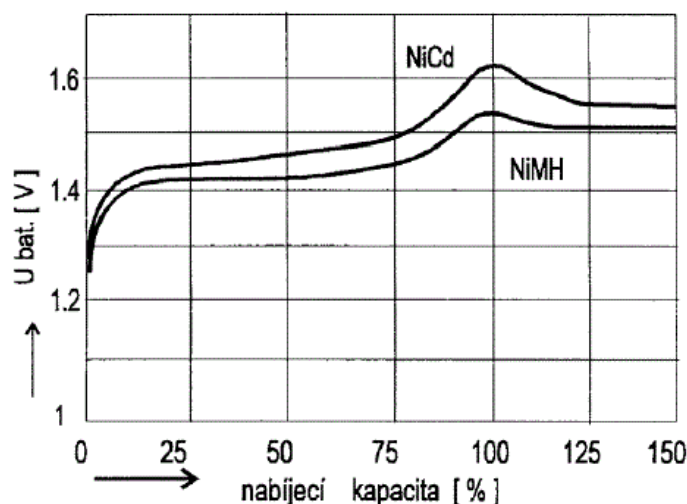


Obr. 1.5: Ilustrační obrázek Ni-MH článku [Převzato z [29]]

1.4.1 Nabíjení Ni-Cd a Ni-MH akumulátorů

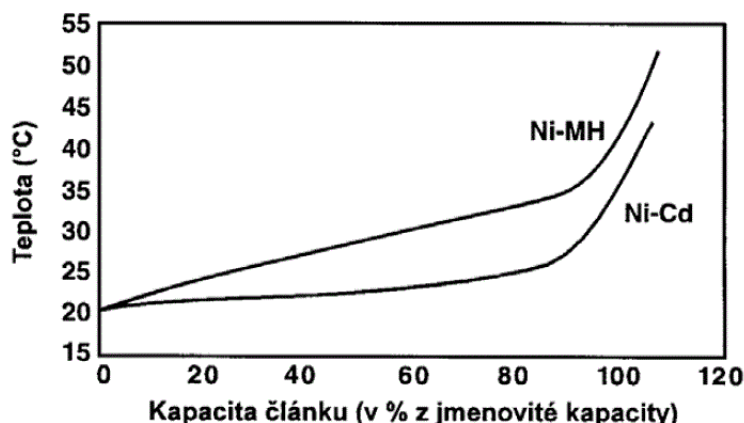
Pro efektivní nabíjení je třeba dodržet několik zásad. Jedna ze zásad je volba vhodné velikosti nabíjecího proudu. Dále je třeba omezit teploty, které při nabíjení rostou. Následně je třeba vybrat vhodnou techniku pro ukončení nabíjení, jelikož při přebíjení roste teplota exponenciálně. Při vhodném uvolnění vzniklého tepla do okolí u uzavřených článků není při volbě vhodného nabíjecího proudu přebíjení problém, jelikož je záporná elektroda předimenzována tak, aby měla větší kapacitu a může tudíž pohltit větší množství kyslíku vznikajícího na kladné elektrodě.

Z obrázku 1.6 je patrný zvýšený nárůst napětí po cca 75 procentech nabití. To je způsobeno právě prudkým uvolňováním kyslíku. Spolu s pokročilostí nabíjení úměrně klesá účinnost nabíjení z důvodu vytváření plynů a tepla. Oproti tomu se vytváří méně aktivního materiálu. U Ni-Cd článků účinnost nabíjecí kapacity dosahuje 83 procent. Tento nedostatek je v praxi nahrazován přebíjením baterie na 140 procent a u Ni-MH na 160 procent.



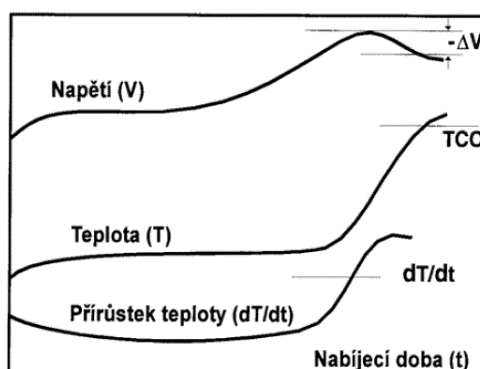
Obr. 1.6: Nabíjecí charakteristika Ni-Cd a Ni-MH článku konstantním proudem [Převzato z [6]]

Jak je uvedeno výše, při nabíjení spolu s napětím roste i teplota. Takovou závislost popisuje obrázek 1.7. Zde je patrné, že teplota u Ni-Cd článků se do 80 procent zvyšuje pozvolna. To je způsobeno tím, že vratná chemická reakce probíhající v elektrolytu je endotermická. U Ni-MH článků je reakce naopak exotermická, proto je patrný svižnější nárůst teploty při nabíjení. Po 80 - 85 procentech nabití dochází spolu s nárůstem teploty i k poklesu napětí.



Obr. 1.7: Teplotní charakteristika Ni-Cd a Ni-MH článku při nabíjení jednonásobkem kapacity článku a za teploty okolí 25°C [Převzato z [6]]

Tento moment můžeme využít pro zjištění doby ukončení nabíjení, jak popisuje obrázek 1.8. Nabíjení chceme přerušit tak, aby nedocházelo k nadměrnému růstu teploty a zároveň nebyl článek přebíjen o více jak 10 procent, jelikož oba tyto faktory přispívají ke zkrácení životnosti.



Obr. 1.8: Ukončení nabíjení na základě teploty (T), Napětí (V) nebo přírůstku teploty (dT/dt) [Převzato z [6]]

Mezi metody ukončení nabíjení bychom mohli zařadit například záporný přírůstek napětí ($-\Delta U/dt$), kdy dochází k přerušení nabíjení v momentu poklesu napětí. Při této metodě je třeba mít na zřeteli, že u článků Ni-MH není pokles napětí tak zřetelný a při malých nabíjecích proudech dokonce nemusí být vůbec přítomen. Proto se u Ni-MH článků používá metoda nulového napěťového přírůstku. Při této metodě dochází k přerušení nabíjení po dosažení vrcholu napětí. Tím se omezí přebíjení. Mezi další způsoby lze například zařadit teplotní ukončení. Při této metodě se po dosažení určité teploty, při které dochází k přebíjení baterie, přeruší nabíjení. Při této metodě je třeba správně nastavit bod pro přerušení nabíjení, jelikož je tato metoda ovlivněna teplotou okolí.

Podle velikosti nabíjecího proudu můžeme rozdělit nabíjení na základě ukončení:

- Pomalé nabíjení - jedná se o nabíjení konstantním proudem rovným desetinně kapa-

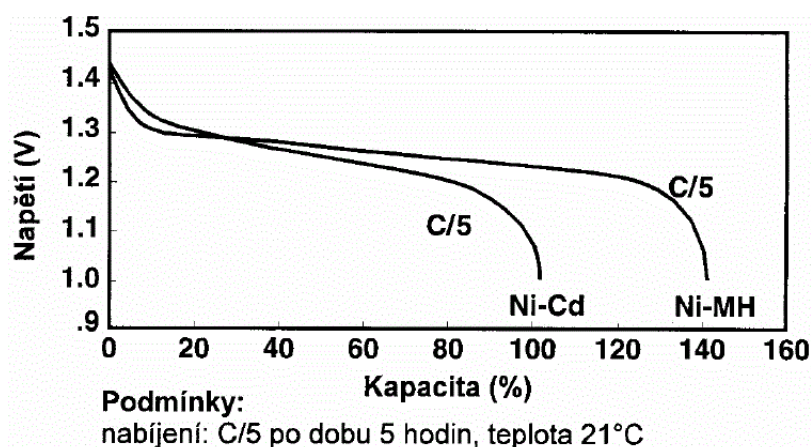
city akumulátoru. Optimálně bychom měli nabíjení přerušit po dosažení 120 procent kapacity.

- Zrychlené nabíjení - při použití většího proudu (třetina kapacity akumulátoru) lze akumulátor bezpečně nabít i bez přílišného nárůstu teploty. Jelikož přírůstek teploty za čas není dostatečný, nelze tuto metodu ukončení nabíjení použít. Ideálně by měla být použita metoda úbytku napětí $(-\Delta)U$ a navíc časovač hlídající dosažení 120 procent nabití.
- Rychlé nabíjení - tato metoda využívá nabíjecí proud o velikosti poloviny až jedno-násobku kapacity akumulátoru. Zde je velice důležité brát zřetel na včasné přerušování nabíjení vzhledem k rychle rostoucí teplotě a tlaku. Pro přerušování nabíjení lze použít jak metodu přírůstu teploty za čas, tak pokles napětí $(-\Delta)U$ a nebo zvýšení teploty $(\Delta)T$.

Pro Ni-Cd i pro Ni-MH je možné použít stejný druh nabíjení, který je odlišný jen ve způsobu ukončení nabíjení. [3], [6]

1.4.2 Vybíjení Ni-Cd a Ni-MH akumulátorů

Články můžeme rozdělit na články pro rychlé nabíjení a vybíjení nebo pro standardní nabíjení a vybíjení. To má přímou souvislost s velikostí vybíjecího proudu. U článků určených pro rychlé vybíjení a nabíjení je vybíjecí proud i mnohonásobně vyšší než proud nabíjecí. Při vyšším úbytku na vnitřním odporu akumulátoru lze ale z článku získat méně energie, než při pomalejším nabíjení. Z obrázku 1.9 můžeme vidět, že kapacita Ni-MH akumulátoru je o 40 procent vyšší oproti Ni-Cd článku stejných rozměrů.



Obr. 1.9: Typická vybíjecí charakteristika Ni-Cd a Ni-MH článků |Převzato z [6]|

Ačkoliv je možné uměle zvýšit kapacitu vybíjením na nižší napětí, je třeba si uvědomit, že by akumulátor neměl být vybíjen pod 1 V/článek (více v 1.6).

Při sériovém zapojení článků se článek s nejnižší kapacitou vybije rychleji než články ostatní. V tu chvíli dochází k tzv. přebíjení článku na opačnou kapacitu. Zdroj [6] tento

stav uvádí jako „overdischarge“ a pravděpodobnost tohoto jevu roste s počtem článků v sérii. Abychom zabránili tomuto stavu, je třeba ukončit stav vybíjení. Pro tento typ článků je typické vybíjecí napětí 1,2 V a 1 V jako vhodné napětí, pro ukončení vybíjecího procesu. [3], [6]

1.5 Vlastnosti Li-Ion akumulátorů

Li-Ion akumulátory jsou v dnešní době výkonné, mají malé rozměry a váhu. Navíc se jednoduše nabíjí a mají malé samovybíjení. To z nich dělá výborný zdroj energie. Musí se s nimi však zacházet s větší šetrností než například s Ni-Cd a Ni-MH akumulátory. Jejich použití spočívá v zařízeních, které mají malý a střední odběr a jsou používány také jako pohony u elektromobilů, elektrokol, dvojkolek apod.



Obr. 1.10: Ilustrační obrázek Li-Ion článku [Převzato z [30]]

Vysoké napětí Li-Ion akumulátorů je právě jednou z jejich předností spolu s již zmíněným velmi malým samovybíjením. Další výhodou je pak absence paměťového jevu a nutnosti údržby, což je velmi vítané pro nejednu aplikaci. Toto jsou důvody pro masivní využívání v drtivé většině elektronických zařízení.

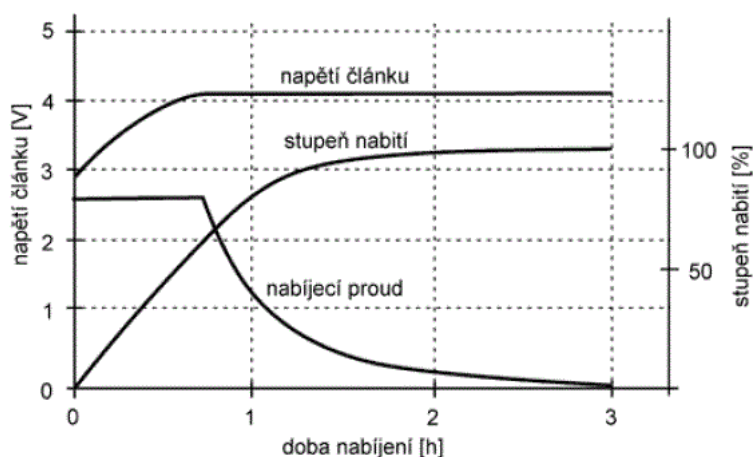
Výhody však doprovázejí i jisté nevýhody. Jednou takovou nevýhodou je vnitřní odpor. Ten je vyšší oproti Ni-Cd. Tato nevýhoda se však postupným vývojem zlepšuje. Další nevýhodou je pak negativní vliv nízkých teplot na akumulátor. Zdroj [9] pojednává o tom, že Li-Ion akumulátory pracující v prostředí o teplotě jen o 10°C nižší, než je pokojová teplota, mají o 20 procent nižší životnost v cyklech. Při teplotách o 40°C nižších, než je pokojová teplota, je snížena životnost v cyklech o celých 40 procent. [6], [9]

1.5.1 Nabíjení Li-Ion akumulátorů

Standardní způsob nabíjení Li-Ion akumulátorů je ze zdroje spolu s omezením nabíjecího proudu stejný, jako je například u olověných akumulátorů. To je popsáno v sekci 1.3.1. Zde ale musíme především dodržet hladinu napětí v konečné fázi nabíjení, a to s větší přesností, než je potřeba u předchozích typů. Pokud dovolíme překročení nabíjecího napětí o hodnotu větší než 1 procento, znatelně se zkrátí životnost akumulátoru. Pokud naopak nabíjecí napětí bude menší o 1 procento než je jmenovitá hodnota konečného nabíjecího napětí, článek se plně nenabíje.

Nabíjecí proud je na druhou stranu relativně libovolný. Výrobce uvádí pouze povolené rozmezí (běžně bývá od 0,1 až 2-násobku jmenovité kapacity). Zde platí pouze pravidlo, že čím je proud větší, tím rychleji se akumulátor nabije. Obrázek 1.11 zobrazuje typický průběh nabíjení Li-Ion akumulátorů. Opět je průběh rozdělen na dvě fáze. V první fázi se akumulátor nabíjí konstantním proudem (nemusí být konstantní, jen nesmí překročit maximální povolenou hodnotu). Po dosažení konečného nabíjecího napětí by měl článek být nabit na zhruba 70 procent své kapacity. To se liší v případě, že před nabitím nebyl „zcela“ vybit. Pak by jeho náboj byl větší. Od této chvíle se nabíjecí proud omezuje a nabíjení zpomaluje. Článek může být v nabíjecím zařízení libovolně dlouho, neboť na konci nabíjení je nabíjecí proud jen zlomkem své původní hodnoty a tak článku nehrozí přehřátí. Vítanou vlastností je také to, že při nabíjení baterie s články o různé hodnotě náboje není vyžadováno další nastavení a pouze nesmíme překročit nabíjecí proud.

Při pořízení nových článků, případně při nabíjení článků předtím hluboce vybitých, probíhá nabíjení velmi malým nabíjecím proudem (jednotky mA), a to do té chvíle, dokud články nedosáhnou napětí 2,7 až 3 V. Nabíjení takovýchto článků velkým proudem může články jednoduše poškodit. [6], [3]



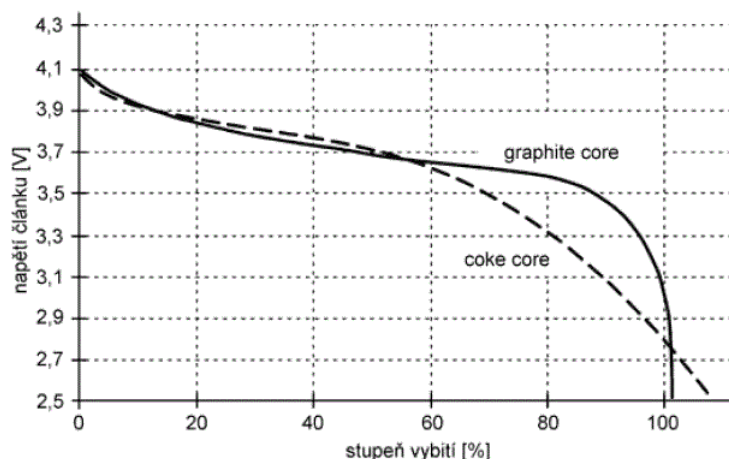
Obr. 1.11: Nabíjecí charakteristika Li-Ion akumulátorů |Převzato z [3]|

1.5.2 Vybíjení Li-Ion akumulátorů

Podle rozdělení uhlíkové anody jsou na trhu dostupné akumulátory koksové „coke“ a grafitové. V akumulátorech s koksovou anodou je použit uhlík ve formě mikrokrystalů. Na rozdíl od grafitu má neorientované krystaly. Tím se mění tvar vybíjecí křivky (více viz 1.12). V tabulce 1.1 je porovnání nabíjecího a vybíjecího napětí u koksového a grafitového akumulátoru. [6], [3]

Typ	max nabíjecí napětí [V]	konečné vybíjecí napětí [V]
koks	4,2	2,5
grafit	4,1	3,0

Tab. 1.1: Vybíjecí a nabíjecí napětí Li-Ion akumulátorů |Převzato z [6]|



Obr. 1.12: Vybíjecí charakteristika Li-Ion akumulátorů |Převzato z [3]|

1.5.2.1 Podoby Li-Ion akumulátorů

V praxi se s tímto druhem akumulátorů setkáme buď ve formě jednotlivých článků, nebo se s nimi můžeme setkat ve formě „akupacků“. Předností akupacků jsou ochranné obvody. Ty zamezují zničení článků při poruše nabíjecího zařízení nebo při špatném zacházení a zajišťují hlídání napětí a proudu článků v mezích určených pro správné použití. Při porušení podmínek dojde k odpojení akumulátoru. Ochranné obvody také umožňují hlídání teploty pomocí termistorů.

Akupacky se používají všude, kde nejsou pro akumulátory zajištěny příznivé podmínky. Běžně bývají v mobilních telefonech, počítačích a jiných přenosných zařízeních. S rozvojem elektricky poháněných vozidel se akupacky využívají i zde. [6]

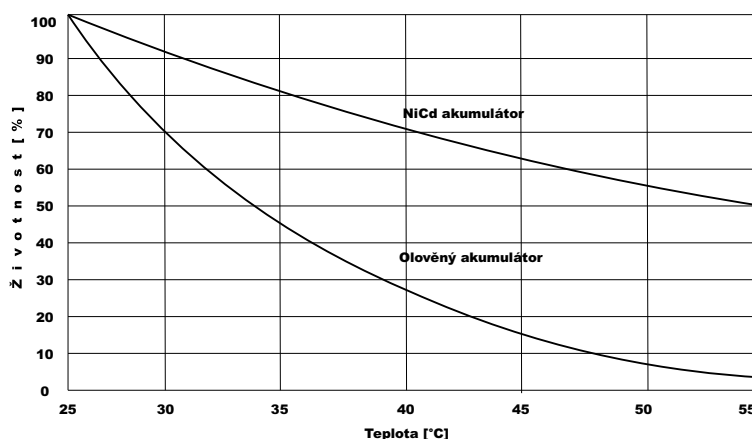
1.6 Negativní vlivy na akumulátory

Pro správnou funkčnost akumulátorů je třeba dodržovat zásady a zbytečně je nevystavovat vlivům, které mají jednoznačný vliv na jejich životnost. Většina negativních vlivů na akumulátory je až na specifické jevy pro všechny zmíněné druhy společná.

Při skladování akumulátorů dochází k tzv. „samovybíjení“. Akumulátor během doby, kdy není používán samovolně ztrácí kapacitu. Je tedy nutné dodržet příznivé podmínky pro daný typ akumulátoru. Pro Li-Ion články je za normální teploty (20°C) pro úbytek kapacity typické až 5 procent za měsíc, což umožňuje zhruba roční skladování bez dobíjení. U olověných je to pak ztráta 40 procent kapacity ročně. U Li-Ion akumulátorů se

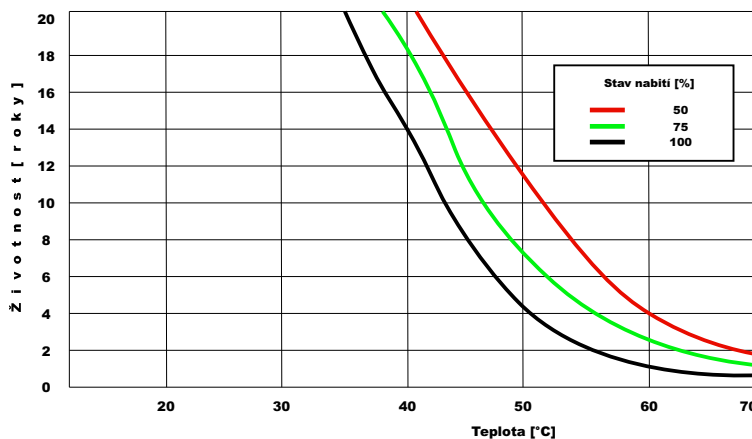
nedoporučuje skladování delší než rok od výroby. Nabití akumulátoru na bezpečnou úroveň je velmi důležité pro správné podmínky skladování přičemž úroveň, na kterou je pro bezpečné skladování akumulátor třeba nabít, se liší dle typu. Je nutné zmínit, že teplota má na životnost akumulátorů velký vliv.

Ačkoliv s teplotou roste kapacita akumulátoru, klesá jejich životnost. Akumulátory dosahují nejvyšší životnosti okolo 25°C. Obrázek 1.13 zobrazuje rozdíl vlivu různých teplot na olověný a Ni-Cd akumulátor.



Obr. 1.13: Porovnání vlivu teploty na Ni-Cd akumulátor a Pb akumulátor [Převzato z [3]]

Na obrázku 1.14 můžeme vidět závislost životnosti na teplotě akumulátoru při různých hladinách nabití a je z něj zřejmé, že životnost s teplotou klesá o více než 6 let při skoku 10°C.



Obr. 1.14: Porovnání vlivu teploty na Li-ion akumulátor při různých hladinách nabití [Převzato z [8]]

Způsobem vybíjení akumulátorů (přesněji hloubkou vybíjení) lze markantně ovlivnit jejich životnost. Zdroj [8] uvádí, že u Li-Ion akumulátorů lze při 10 procentní hloubce vybíjení zvýšit počet cyklů až k deseti milionům. To je však pro použití akumulátorů značně nepraktické vzhledem k tomu, že kapacita akumulátorů je jedním z hlavních důvodů jejich používání. Není ale na škodu spokojit se s kompromisem, nenabíjet baterie

nad 85 procent, hluboce je nevybíjet a tím bychom mohli získat přibližně o 50 procent cyklů navíc.

V 1.4.2 je zmíněný jev známý jako „overdischarge“. Zdroj [7] uvádí, že při hlubokém vybití akumulátoru je možné, že akumulátor již nebude reagovat na elektrický proud a stane se tak nepoužitelný. V případě, že na tento extrém nedojde a akumulátor bude stále možné nabít je však jisté, že poškozený článek již nebude možné zcela nabít a životnost bude snížena.

V případě, že je baterie vybíjena mnohokrát za sebou v krátkém intervalu na přesně stejnou hodnotu a následným úplným nabitím se dostavuje tzv. „paměťový efekt“. Ten omezuje kapacitu u Ni-Cd článků, u kterých je jev nejtypičtější, avšak je relativně obtížné ho dosáhnout, protože je třeba vybíjet baterii za podmínek uvedených výše. Pokud je umožněn přístup k jednotlivým článkům baterie, je možno paměťový efekt odstranit jednou z následujících podmínek:

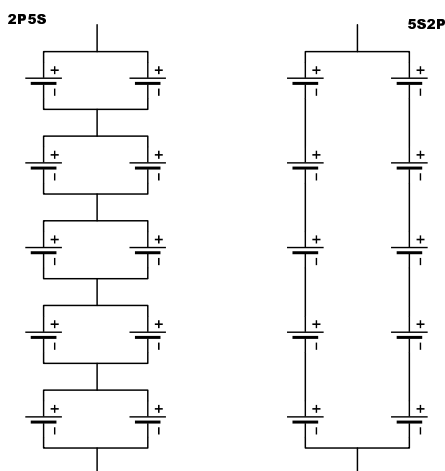
- přebíjením baterie,
- změnou úrovně vybití o několik procent,
- menším napětím na článek (pod 1 V).

Přílišným přebíjením můžeme akumulátory též spolehlivě zničit. Například při nabíjení Li-Ion článků nad 4,3 V se zvyšuje pravděpodobnost zničení. [3], [6], [7], [8]

1.7 Nejběžnější druhy zapojení článků

Rozdělení zapojení článků podle zdroje [5]:

- Sériové spojení - Jedná se o spojení, kde každý kladný pól je připojený k zápornému dalšího článku. Tímto způsobem docílíme vyššího napětí při stejné kapacitě.
- Paralelní spojení - Spojení charakteristické spojením všech kladných pólů jednotlivě spojených dohromady a všech záporných spojených též dohromady. Paralelním zapojením dosáhneme vyšší hodnoty kapacity za stejného napětí.
- Paralelně sériové spojení
- Sérioparalelní spojení



Obr. 1.15: Paralelně sériové zapojení (vlevo) a sérioparalelní (vpravo) [Převzato z [5]]

Ačkoliv jsou články stejné sady konstruovány stejným způsobem, vlivem chemických procesů uvnitř článku a vnějšími podmínkami dochází k rozdílu napětí u jednotlivých článků. Proto musíme při spojování článků dodržet některé zásady. Jednou ze zásad je například nutnost spojovat jednotlivé články se stejným napětím s přesností na setiny nebo spojovat články stejné sady. Dále je nezbytné při výběru článků z různých sad podrobně změřit vybíjecí charakteristiky. [6], [5]

2

Battery Management System

Battery Management System (dále jen BMS) a jeho vývoj lze považovat za odpověď na nedostatky akumulátorů v oblasti výkonové účinnosti, monitorování a bezpečnostních prvků. Během poslední dekády prochází BMS velmi aktivním vývojem co se týče ovládací i výkonové oblasti. BMS lze popsat jako „mozek“ systému pro použití baterií sestávající z obvodů a algoritmů určených k efektivnímu, a přesto šetrnému zacházení s bateriemi na základě požadavků daného zařízení. BMS je obecně rozdělen do dvou segmentů:

- **Monitorování:** Nezbytný prvek, kterým získáváme informace o stavu baterie. Důležitými funkcemi monitorování jsou měření a odhad. Měřením získáváme informace o základních veličinách baterie, jako je například napětí článků, teplota uvnitř a vně baterie. Žádoucí je také měření impedance baterie, což bohužel vzhledem k současné technologii není možné. Zde přichází na řadu odhad. Stav nabití, „zdraví“ a pokročilost v cyklu životnosti baterie jsou parametry, které není možné přímo měřit. Z toho důvodu je třeba je odvodit z veličin přímo měřitelných. Součástí účelu monitorování je také diagnostika. Existuje mnoho důvodů pro poruchy BMS a baterií, například se může jednat o poruchy obvodů, sítě nebo jednoho z článků. V takovém případě je odpovědný za detekci a signalizaci daného problému pro snazší určení příčiny.
- **Ovládaní:** Tento segment pak přímo vychází z naměřených hodnot, na které reaguje. Jedná se o proces nabíjení a vybíjení baterií při velikostech veličin doporučených výrobcem a tak prodloužení jejich životnosti. Velmi důležitý je sběr informací o stáří baterie, díky čemuž se velikosti veličin přizpůsobují. Dále se do ovládaní řadí mezi jiné i balancování článků baterie a správa teploty. [11]

2.1 Odhad veličin

Celá tato sekce vychází ze zdroje [11].

2.1.1 Odhad stavu nabití baterie

Stav nabití baterie je definovaný jako poměr koncentrace aktivního materiálu na elektrodě ku maximální možné koncentraci. Stav nabití nabývá hodnot od 0 do 1. To popisuje množství uložené energie v baterii. Důležitost stavu nabití bychom mohli považovat za stejně důležitou, jako je ručička ukazující stav paliva v automobilu, jelikož slouží jako všeobecně chápaný indikátor ukazující stav, který si lze velmi jednoduše představit. Odhad stavu nabití (SoC) lze provádět přímými nebo nepřímými metodami.

2.1.1.1 Přímé metody odhadu stavu nabití

Přímé metody využívají měření založené na výpočtu spotřeby baterie a jsou označovány jako metody počítající s Ah (C). Základní vztah popisuje rovnice 2.1, kde S_oC_0 je stav nabití v čase $t = 0$.

$$S_oC = S_oC_0 - \frac{t_0}{t} \int_a^b \eta I(\tau) d\tau \quad [Ah; s, A] \quad (2.1)$$

Nevýhoda výpočtu tímto způsobem je v nutnosti znát počáteční stav nabití baterie. Tyto metody navíc trpí výpočetní chybou právě kvůli přítomnosti integrálního výpočtu. Tento způsob výpočtu má jisté modifikace zlepšující přesnost výpočtu.

2.1.1.2 Nepřímé metody odhadu stavu nabití

Tyto metody se snaží odhadnout stav nabití pomocí měření a výpočtů jiných parametrů. Obecně jsou rozděleny do datových a modelových metod.

Datové metody zahrnují impedanci nebo napětí baterie naprázdno k vyhodnocení stavu nabití. Nevýhodou tohoto způsobu je například nutnost měření vlastností baterie, které není možné v reálném čase provozu vykonat. Další kategorií datových metod je pak umělá inteligence. Metodou „fuzzy logiky“ nebo „neuronové sítě“ je odvozena doba nabití. I tyto metody mají svoji nevýhodu a ačkoliv jsou velmi přesné, je nutný dlouhodobý sběr dat.

Modelové metody prošly intenzivním vývojem především díky možnosti využití výpočtů v reálném čase a vykazují slibné výsledky. Tyto metody pracují s předem vytvořeným matematickým modelem baterie daného typu.

2.1.2 Odhad zdraví baterie

Definice stavu zdraví oproti stavu nabití baterie nemá přesnou definici v literatuře. Obecně tato veličina odkazuje na stárnutí a degradaci baterií v porovnání s jejich jmenovitými hodnotami.

V průběhu času bylo vyvinuto mnoho různých laboratorních metod pro zjišťování zdraví baterií, jako je například rentgenová metoda, metoda voltametrie, impedanční

spektroskopie a další. Většina těchto metod ale není vhodná pro monitorování v reálném čase, a tak není vhodná pro reálné využití.

Běžnou praktickou metodou v praxi je metoda měření impedance. Ačkoliv tato metoda poskytuje přesné výsledky, není její použití vhodné pro online monitorování a navíc je nutné zastavit provoz baterie pro vyslání testovacího signálu a následné provedení rozsáhlých měření. Současné metody pro online monitorování přistupují na základě ekvivalentního modelu baterie pro odhad stavu zdraví baterie. Zde se z hodnot měření konkrétní kapacity nebo odporu získávají data pro odhad stavu zdraví baterie.

Z předchozího textu vyplývá, že i když je možné provést odhad zdraví baterie, jedná se pouze o velmi hrubý odhad, neboť modely, které by přesněji korespondovaly se stárnutím baterie, jsou stále v intenzivním vývoji.

2.1.3 Odhad stavu života baterie

Stav života baterie odkazuje na zbylou dobu životnosti baterie. Snaha o předpověď počtu zbývajících cyklů baterie je v praxi žádaná. Momentálně není ucelená metoda pro zjištění pokročilosti životnosti baterie a velmi záleží na chemickém složení Li-Ion baterií a jejich dosavadní historii nabíjecích cyklů. Ačkoliv lze v literatuře nalézt modely odkazující na odhad životnosti baterie je nutno podotknout, že se jedná o reprezentaci skrze ztrátu kapacity za jednotku času.

2.2 Balancování bateriových článků

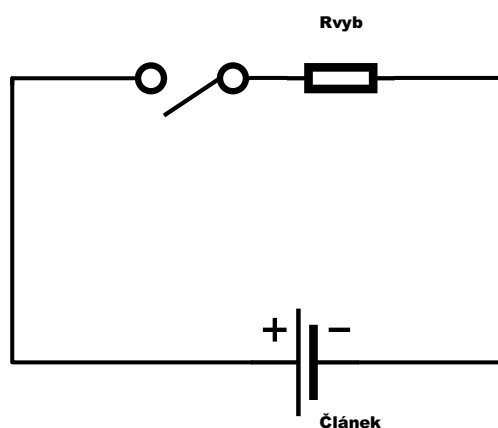
V sekci 1.7 je nastíněna problematika nerovnoměrnosti napětí bateriových článků. Nelze vytvořit dva naprosto identické články. Články se mohou lišit ve vnitřním odporu, kapacitě, tepelných charakteristikách a dále například v samovybíjení. V akupacku se velmi často stává, že některé články jsou vybíjeny rychleji a některé naopak pomaleji. To vede k postupné degradaci baterií. Balancování článků v rámci BMS přispívá k prodloužení života baterií nejen v cyklech, ale i v době provozu na jedno nabití.

2.2.1 Princip balancování článků

Balancování článku je rozděleno do dvou technik:

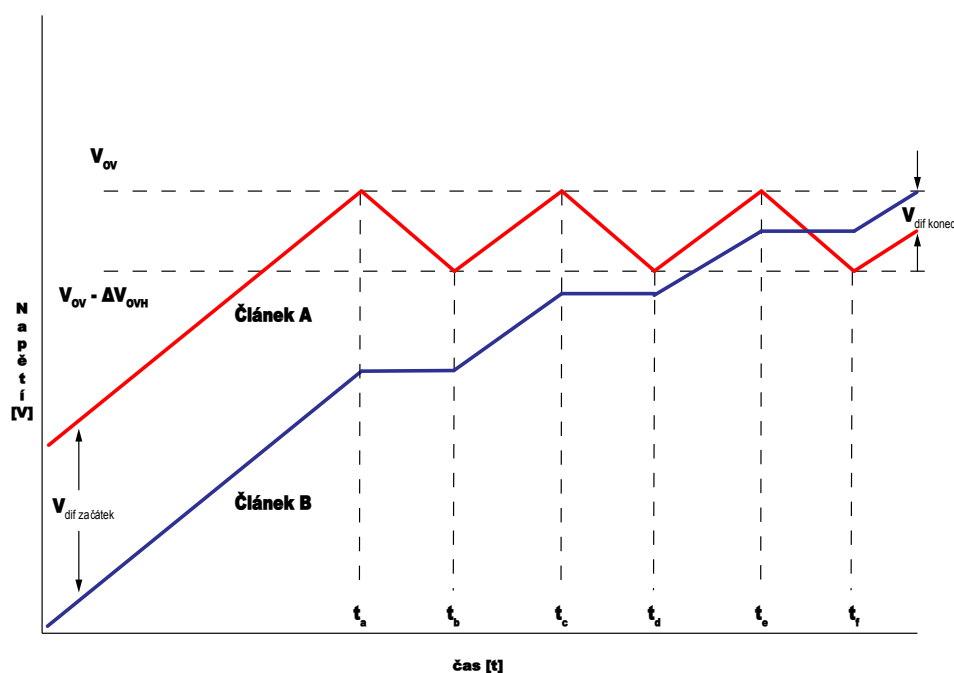
- pasivní balancování,
- aktivní balancování.

Pasivní balancování lze uvažovat jako méně náročné z hlediska konstrukce a ekonomické perspektivy. Principem je vyrovnání napěťové hladiny s méně nabitými články pomocí spínače a rezistoru (viz obrázek 2.1). V rezistoru se přebytečná energie „zmaří“. Vzhledem ke globální snaze využít co nejvíce energie je pro větší výkony tato metoda nevhodná.



Obr. 2.1: Princip pasivního balancování [Převzato z [18]]

Na obrázku 2.2 je zobrazena metoda pasivního balancování využívající algoritmus, který balancuje pouze na základě hodnot napětí článků. To může vést k nepřesnému vyhodnocení hodnot pro balancování. To je způsobeno impedancí článků. Algoritmus nerozpozná u jednotlivých článků, zda je rozdíl napětí způsoben kapacitním nebo induktivním charakterem impedance. Díky tomu je možnost rozdílu v napětí jednotlivých článků i po ukončení cyklu balancování a články tak nedosáhnou 100 procent na plné nabití. [16]



Obr. 2.2: Jednoduché balancování na základě napětí. V_{OV} - detekční hranice přebití, ΔV_{OVH} - pásmo necitlivosti detekce přebití. [Převzato z [16]]

Námi použité obvody s LTC6804-1 používají pasivní balancování na základě hodnot napětí s maximální chybou 1,2 mV doplněné o programovatelný časovač a rychlému měření všech článků nepřesahující 290 μ s. To umožňuje použití větších nabíjecích proudů. To je

vítané u aplikací, kde je potřeba vybíjet a nabíjet akumulátory v krátkých časových intervalech. Vzhledem k vybranému typu akumulátorů je třeba balancování přizpůsobit a to tak, že bude prováděno pouze v přijatelných hladinách napětí článků (3,5 - 4,1 V), aby nedošlo k přílišnému vybití článků vzhledem k charakteru pasivního balancování. [17]

Aktivní balancování naopak pracuje na principu ukládání přebytečné energie v kapacitním nebo induktivním prvku. Tím lze naakumulovanou energii uvolnit v případě potřeby s malými ztrátami. [16]

2.3 Tržní dostupnost BMS

Existuje množství produktů určených pro BMS. Dle požadavků si můžeme vybrat od monitorů, které měří články, počítají hladinu nabití a poskytují možnost bezpečnostního vypnutí, až po takzvané „protektory“ poskytující balancování článků a zároveň odpojování od sítě. Ceny se přitom pohybují v přepočtu mezi 3 500 - 205 000 Kč. [12]

2.3.1 BMS24T

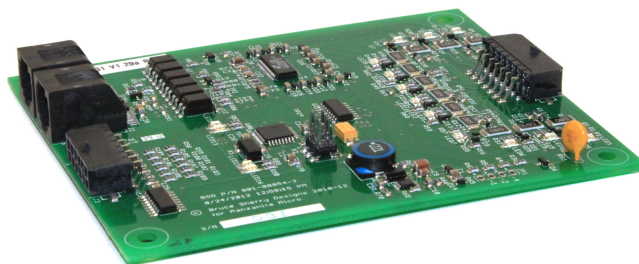
BMS řešení od čínské značky CHARGERLY je určeno přímo pro lithiové akumulátory. Jednotka je schopna měřit napětí článků, regulovat nabíjecí a vybíjecí proudy a to až do 600 A, měřit teplotu baterie a odhadovat stav nabití baterie. To vše spolu s uživatelským rozhraním, které je zobrazeno na vestavěném LCD monitoru. BMS24T poskytuje možnost zapojit až 24 článků a veškeré veličiny zobrazuje ve formě grafů. Další funkcí je balancování, které lze zapnout pro režim nabíjení a vybíjení zvlášť. To je založeno na proudu o velikosti 1,2 A na každý článek. Balancování probíhá s přesností na 8 mV. Cenovka činí v přepočtu 6 700 Kč. Nevýhoda tkví především ve větších rozměrech tohoto zařízení a menší skladnosti v použitém vozidle. Na obrázku 2.3 můžeme vidět celé zařízení. [13]



Obr. 2.3: Systém pro správu baterií BMS24T |Převzato z [13]|

2.3.2 Mk3x12

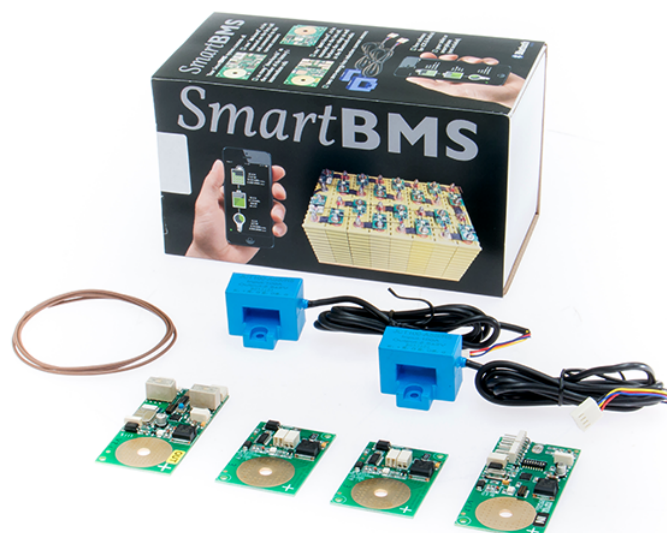
Dalším řešením BMS je od firmy Manzanita Micro. Jedná se „balancer“ měřící napětí na článcích (až 12). Výhodou je snadné připojení k PC pomocí USB donglu. Nevýhodou je pak to, že se onen dongle musí dokoupit zvlášť s cenovkou 2 500 Kč. Zvlášť se také prodává jednotka pro zjištění stavu nabití za 9 500 Kč. Zvlášť se také musí dokupovat teplotní senzor. Tyto okolnosti dělají z tohoto produktu nevhodné zařízení pro účel práce. Obrázek 2.4 zobrazuje obvod pro balancování s detekcí nízkého a vysokého napětí. [14]



Obr. 2.4: Systém pro správu baterií Mk3x12 |Převzato z [31]|

2.3.3 123SmartBMS

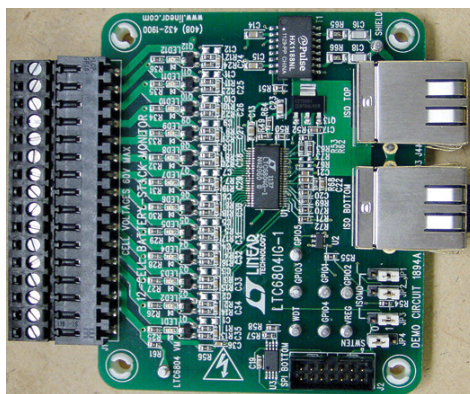
Jako další příklad si uvedeme BMS od nizozemské firmy Albertronic B.V., který není pro Li-Ion baterie původně určen, avšak po menších úpravách s Li-Ion bateriemi pracuje bezproblémově. BMS nabízí nastavitelné rozmezí napětí, proudový senzor, kalibraci a téměř přednastavený automatizovaný systém. Součástí produktu je i aplikace, která s BMS komunikuje pomocí bluetooth. Proud balancování je 1 A a BMS disponuje také stand-by odběrem pod 2 mA, kterým udržuje bluetooth komunikaci a senzory v provozu i v době, kdy není zařízení aktivně používáno. A/D převodník pak pracuje s desetibitovým rozlišením. Výhodou je přizpůsobitelnost, velmi jednoduché nastavení, přehledný manuál a velmi příznivé uživatelské rozhraní mobilní aplikace. Ačkoliv lze sadu rozšiřovat až na 255 článků, cena základní sady se pohybuje okolo 6 000 Kč. Vzhledem k tomu, že základní sada nabízí pouze dva moduly pro články, vyšplhala by se nám finální cena až na šestinásobek. Další nevýhoda pak vychází z předchozí. Tou jsou rozměry při vyšším počtu článků, jelikož pro 4 články potřebujeme 4 moduly. Kompletní sadu s bluetooth modulem můžeme vidět na obrázku 2.5. [15]



Obr. 2.5: Systém pro správu baterií 123BMS [Převzato z [32]]

2.3.4 LTC6804-1

Správou baterií se zabývá aktivně i Linear Technology. Jejich integrované obvody LTC680X jsou ekvivalentem pro BMS s pasivním balancováním. Konkrétně LTC6804-1 využívá Zenerovy diody pro přesnější hodnoty referenčního napětí a snížení tak chyby o 0,8 mV oproti předchozím modelům. LTC6804-1 umožňuje připojit až 12 článků na obvod, přičemž obvody je možné propojovat mezi sebou dvou vodičovým izolovaným isoSPI rozhraním. Díky tomu lze nastrojit až 100 článků. Hodnota těchto integrovaných obvodů se pohybuje kolem 600 Kč a již zhotovené desky připravené na připojení ke kontroléru stojí zhruba 5 000 Kč. Desky již obsahují všechny součástky potřebné pro měření napětí, teploty, odhadu stavu nabití, signalizační LED diody a další. Zhotovená deska je na obrázku 2.6. LTC6804 se tedy jeví jako ideální produkt pro realizaci projektu práce. [17], [19]



Obr. 2.6: Již zhotovená deska plošných spojů DC1894B s obvodem LTC6804-1 |Převzato z [20]|

2.4 Výběr BMS obvodu

Při uvážení faktorů, jakými jsou cena, rozměry, funkce, účel využití a pro jaký typ akumulátorů je daná varianta BMS určena, se jeví jako nejlepší možnost obvod od Linear Technology s LTC6804. Oproti zadání, ve kterém byl jako jeden z bodů uveden návrh desky s LTC6804 v programu Altium Designer, byla využita možnost zakoupit již zhotovené „demo boardy“. To je výhodné hlavně díky tomu, že je omezen vliv rušení, na které je obvod náchylný. Také je možné se větší část časového rozmezí pro tvorbu projektu zabývat softwarovými aspekty BMS, jakými jsou například řízení balancování, řízení napětí a bezpečnostní prvky. Při uvážení potřeby dvou těchto desek (pro 24 článků) se cena pohybuje kolem 10 000 Kč. To je vzhledem ke klíčovým vlastnostem méně než u mnohých jiných řešení BMS.

3

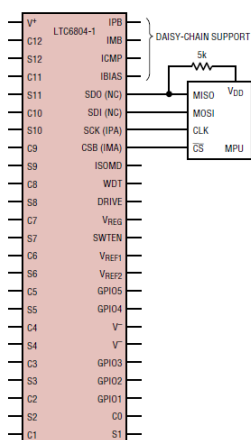
Návrh monitorovacího zařízení

Zařízení pro správu Li-ion baterií se skládá z několika celků. Stěžejní částí jsou obvody pro monitorování a balancování akumulátorů. Těmito obvody jsou DC1894B od Linear Technology. Tyto obvody disponují již výše zmíněnými LTC6804-1. Obvody byly použity dva, jelikož jeden obvod je schopen měřit a balancovat maximálně 12 článků.

Další neméně důležitou částí je CPU. Jako CPU modul slouží v tomto případě MSP430F5529 od Texas Instruments. Řada MSP430 je charakteristická především nízkou spotřebou, která je pro aplikace, u kterých figuruje napájení akumulátory stěžejní. Dalším důvodem použití tohoto modulu je široké využití v jiných projektech na katedře elektromechaniky a výkonové elektroniky. Základní schéma zapojení je na obrázku 3.2. [21]

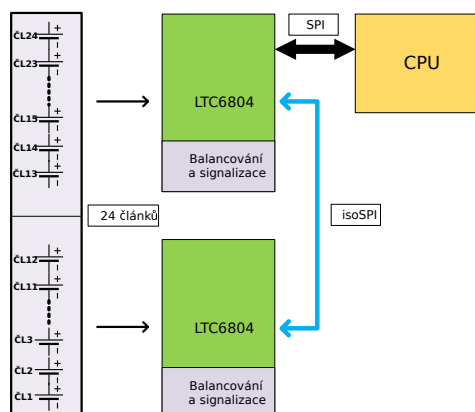
3.1 Zapojení zařízení pro správu baterií

Obvod DC1894B disponuje 14-pinovým SPI konektorem. Pro realizaci SPI komunikace je třeba propojení 4 pinů: CS, GND, MISO a MOSI. Pro správnou komunikaci SPI je potřeba připojit pull-up rezistor mezi SDO - MISO a V_{DD} mikrokontroléru (viz obr. 3.1). V datasheetu je uvedeno, že nominální hodnota rezistoru je 5 k Ω .



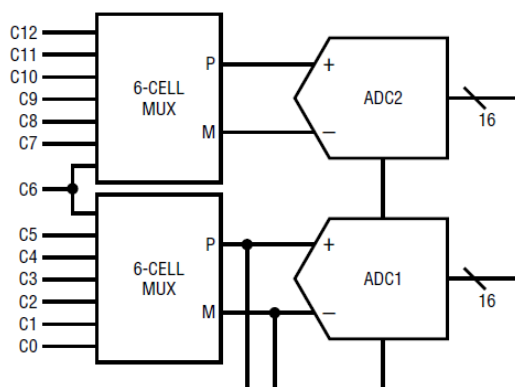
Obr. 3.1: 4-vodičové zapojení SPI |Převzato z [17]|

Obrázek 3.2 zobrazuje blokové schéma zapojení celého zařízení. Ke každému obvodu DC1894 je připojeno po 12 článků a ty jsou měřeny a balancovány. Můžeme vidět, že jeden z obvodů je připojen k CPU modulu pomocí 4-vodičového SPI a následně k druhému LTC6804 pomocí isoSPI.



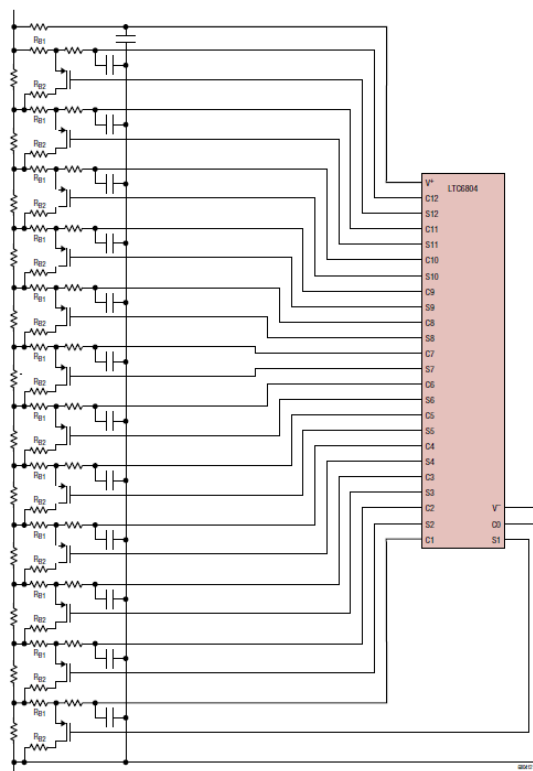
Obr. 3.2: Blokové schéma zařízení pro správu BMS |Převzato z [17]|

LTC6804 obsahuje dva A/D převodníky, z nichž každý je připojen na vlastní multiplexer. Mezi dva multiplexery je pak všech 12 článků rovnoměrně uspořádáno. Díky tomu je dosaženo rychlejšího měření a konverze napětí článků. Zapojení článků do multiplexerů a následně do A/D převodníků je blokově ukázáno na obrázku 3.3. Piny C_n zde mají význam elektrod článků. Získávání hodnot pro A/D převodníky pak probíhá následovně: Získání dat z pinu C_1 a C_7 , následně C_2 a C_8 a tak dále. [17]



Obr. 3.3: Blokové schéma zapojení článků s A/D převodníky a multiplexery |Převzato z [17]|

Pro testování posloužilo 24 rezistorů o hodnotě 100Ω po 12 sériově zapojených na piny desky sloužících pro připojení článků. Ty byly napájeny stejnosměrným napětím o velikosti 40 V. Tato hodnota napětí v kombinaci s hodnotami odporu byla stanovena jako ideální hned ze dvou důvodů. Jednak bylo na odporech dosaženo napětí odpovídající hladině vyhovující Li-ion článkům a také bylo dosaženo dostatečného napětí potřebného pro rozsvícení signalizačních diod pro balancování. Schéma zapojení testovacích rezistorů je na obrázku 3.4. Rezistory jsou zapojeny sériově a napájecí napětí je tak děleno počtem rezistorů.



Obr. 3.4: Schéma zapojení s rezistoy pro testování |Převzato z [17]|

Mikrokontrolér je připojen přes USB do počítače, kam posílá data přes rozhraní UART, která jsou následně zpracována pro vizualizaci hodnot napětí do grafů.

3.1.1 A/D převodník

Převodníky jsou v dnešní době běžnou součástí analogových vstupních obvodů. Do těch je postupně přes analogový multiplexer ze vstupů a vzorkovače typicky složeného ze zesilovače, spínače a kondenzátoru přiváděn signál. Převodníky také disponují referenčními hodnotami, které určují rozmezí číslicových hodnot. Například spodní referenční hodnota, bude převedena na 00.00 v binárním kódu.

Existují různé druhy převodníků. Od 24 bitových sigma-delta převodníků, které disponují nejvyšší přesností až po aproximační, kterými disponují obvody v jednočipovém provedení. Aproximační převodníky jsou však kompromisem mezi rychlostí a přesností. Proto nejsou vhodné jako řešení, kde je na přesnost výsledků brán velký zřetel. Dalším typem jsou tzv. „flash convertery“. Ty jsou využívány pro jejich rychlost a jsou charakteristické především jejich paralelním přístupem. Vždy je pak naráz měřeno tolik vstupů, kolik je převodníků. V našem případě jsou použity 16-ti bitové sigma-delta převodníky, které jsou vždy po dvojicích pro paralelní přístup. V tom případě je zajištěna jak přesnost, tak i rychlost.

V případě vícebitového převodníku existují jistá úskalí. Jedním z těchto úskalí je například to, že pro rozmezí 0 až +5 V u 16-ti bitového převodníku připadá na nejnižší bit

76 μV . To je hodnota, kterou může rušení snadno znehodnotit. Je tak zapotřebí dokonalého stínění a perfektních plošných spojů. Právě z tohoto důvodu byly pro tento projekt zakoupeny již hotové obvody namísto původního plánu uvedeného v zadání práce, který spočíval v návrhu obvodu pomocí softwaru Altium Designer. Při přítomnosti analogových a číslicových obvodů na jednom plošném spoji je velmi důležité dodržet pravidla, jakými jsou například oddělené zemnicí vodiče nebo izolační bariéry. [26]

3.1.2 Sériové periferní rozhraní - SPI

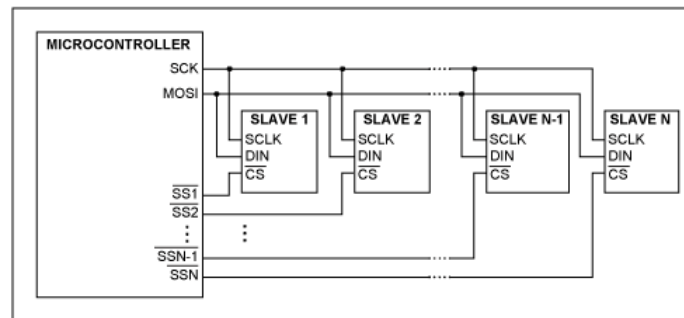
SPI je druh komunikace používaný pro komunikaci procesoru s integrovanými obvody. SPI je využívána pro spojení s převodníky, senzory a podobně. Základem této komunikace jsou 3 vodiče. Existují také varianty s třemi vodiči nebo více než čtyřmi vodiči. Tři společné vodiče tvoří SDI (Serial Data In), SDO (Serial Data Out), SCK (synchronní hodinové pulzy). Signály se z výše uvedených vodičů, včetně CS (Chip Select), rozvádějí do řídicích obvodů, vyrovnávacího registru a posuvného registru. Posuvný registr za pulzů synchronních hodinových cyklů předává data na datovou sběrnici nebo je naopak ukládá do vyrovnávacího registru a poté zpracovává. Jelikož se jedná o sběrnici, se kterou může pracovat jen jedno zařízení současně, přichází na řadu signál CS. Jelikož se jedná o třístavové obvody, je třeba dbát na to, aby bylo na sběrnici aktivně připojeno jen jedno zařízení (CS v aktivním stavu). Nedodržení této podmínky by vedlo k destrukci zařízení, jelikož v koncových stupních zařízení by došlo k průchodu vyrovnávacích proudů, jejichž tepelné účinky by měli onen destruktivní charakter.

Zařízení, které se může připojit na sběrnici dle postupu programu se nazývá „master“. Zařízení, které se smí připojit na sběrnici na požadavek mastera, se nazývá „slave“. Komunikace probíhá nejčastěji po jednom bytu.

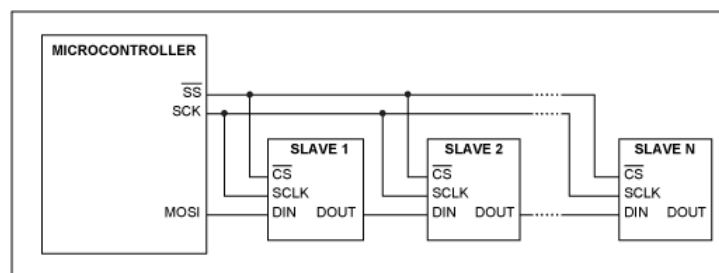
Klasický způsob komunikace s vícem podřízených zařízení je ten, že každé zařízení má svůj vlastní CS vodič, který je u slaveů popsán jako SS (Slave Select). Pouze to zařízení, se kterým chceme komunikovat, má pak SS v aktivní hodnotě. [26]

Alternativou je pak tzv. „Daisy-Chain“. Příkazy přímo z mikrokontroléru jdou pouze do prvního podřízeného zařízení. To má pak na výstupu připojen vstup dalšího podřízeného zařízení. Namísto nutnosti více SS signálů stačí pouze jeden CS signál a data jsou předávána z mikrokontroléru až do posledního podřízeného zařízení. Tato metoda je použita i v našem případě, kdy je vstup prvního slaveu připojen k mikrokontroléru a komunikace mezi podřízenými zařízeními je pak realizována pomocí izolované dvou vodičové isoSPI komunikace.

Na obrázku 3.5 je zobrazeno zapojení, kdy jsou všechna podřízená zařízení ovládána přímo z výstupu MOSI. Obrázek 3.6 oproti tomu ukazuje způsob zvaný „Daisy-Chain“



Obr. 3.5: SPI komunikace s vícem SLAVEŮ |Převzato z [22]|



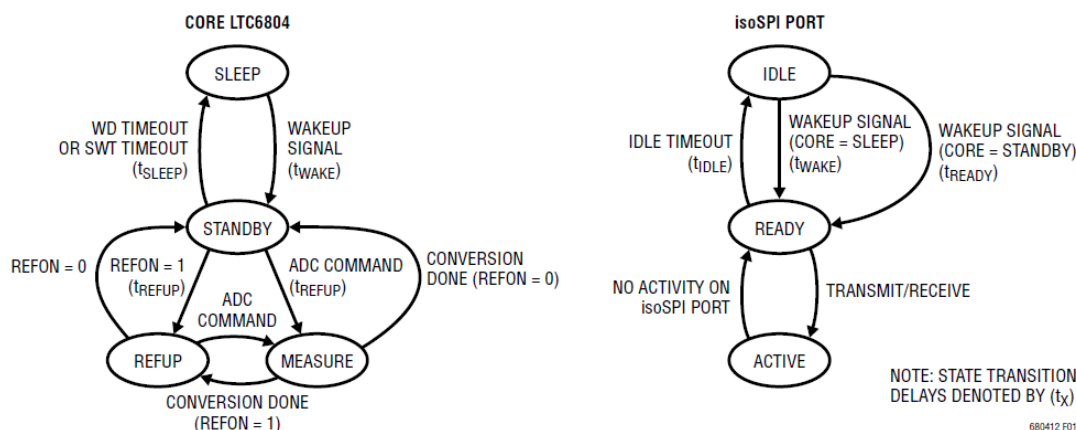
Obr. 3.6: SPI komunikace způsobem daisy-chain |Převzato z [22]|

3.1.2.1 Časování sériové komunikace

Je třeba také poznamenat, že pro správnou funkčnost zařízení je nutné dodržovat doby časování. LTC6804 disponuje několika pracovními stavy. Obrázek 3.7 popisuje tyto pracovní stavy spolu s časy, které je třeba dodržet. Obvod má v konfiguračních registrech maskovatelný bit pro časovač, který lze nastavit pro účel uspaní zařízení. Zařízení se dostane do režimu „SLEEP“ po uplynutí času t_{SLEEP} nebo po každém dokončení konverze A/D převodníku (dále jako AD převodník). Vždy, když je vyslán příkaz přes SPI do LTC6804, musíme nejen čekat na probuzení základního obvodu, ale musíme též poskytnout dostatek času k probuzení isoSPI portu, to zpravidla trvá déle než probuzení komunikace přes SPI. Ve chvíli, kdy je LTC6804 připraveno ke komunikaci, je vyslán pulz na port isoSPI. V konfiguraci „daisy-chain“ tento pulz probouzí zařízení, které je připojené jako další v pořadí. Čas, který je potřeba k probuzení je roven:

$N \cdot t_{WAKE}$ nebo $N \cdot t_{READY}$ v závislosti na počátečním stavu obvodu připojeného k mikrokontroléru, kde t_{WAKE} je typicky $100 \mu s$ a t_{READY} maximálně $10 \mu s$. N je počet obvodů v „daisy-chain“ zapojení.

Stav „SLEEP“ slouží pro snížení spotřeby v době, kdy není zařízení aktivně používáno. Při režimu „SLEEP“ spotřeba proudu nepřekračuje $4 \mu A$. [17]



Obr. 3.7: Diagram pracovních stavů LTC6804 (vlevo) a isoSPI portu (vpravo) |Převzato z [17]|

3.1.3 Asynchronní přenos UART

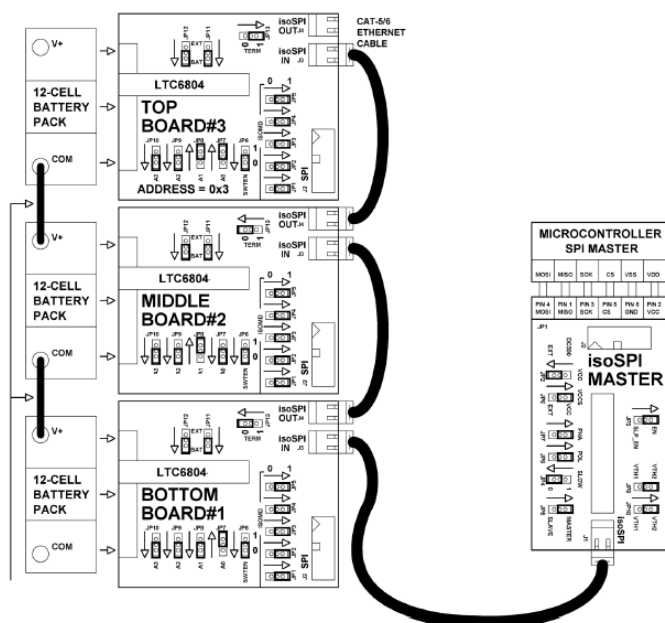
Při této komunikaci je využit přenos 7 nebo 8 bitů se znakovou synchronizací. Znaky pak mohou mít mezi sebou libovolnou prodlevu. V momentě přenosu je vyslán „start bit“, který je nulový. Po skončení přenosu je poslán „stop bit“. Je také možný přenos paritního bitu pro kontrolu chyb. Přijímač při této komunikaci má vlastní oscilátor s předděličem a případným čítačem pro další dělení kmitočtu. Stejný kmitočet vysílače a přijímače ale není jediné kritérium pro správnou funkci přenosu. Tím je také fáze kmitočtu. U tohoto typu komunikace jsou po detekci hrany spuštěny řídicí obvody a tím i čítač. Bity jsou vzorkovány a přes klopný obvod přenášeny do posuvného registru. Ideální doba vzorkování je zhruba uprostřed trvání jednoho bitu.

Ačkoliv je fáze kmitů přijímače a zdroje potřebná, je u UART komunikace relativně velká rezerva pro výchylku. Po přenesení deseti bitů sice vzniká vzorkovací chyba posunem ze středu trvání k okraji trvání bitu. Pokud jsou tedy přenášena data po bytech, chyba rámce nehrozí. [26]

3.2 První oživení zařízení pro správu BMS

Spolu se dvěma obvody DC1894B byl také pořízen obvod DC2026C známý pod názvem „Linduino One“. Tento obvod je zcela kompatibilní s Arduino Uno mikrokontrolérem a v jiných aplikacích může sloužit pro isoSPI komunikaci s evaluačními deskami jako isoSPI MASTER a naopak jako SLAVE pro nadřazený mikrokontrolér vybraný uživatelem. Toto zapojení je ukázáno na obrázku 3.8. Namísto námi používaných LTC6804-1 jsou zde ale obvody s LTC6804-2. Mezi těmito obvody je rozdíl především v adresovatelnosti konfiguračních registrů, což pro představu zapojení není nijak rozhodující. [24], [23]

Důvodem pro pořízení Linduino mikrokontroléru byla především možnost emulace obvodu pro využití softwaru „QuickEval“. Jedná se o software, který je plně kompatibilní s LTC6804 a poskytuje jednak téměř plně funkční program pro obsluhu evaluačních ob-

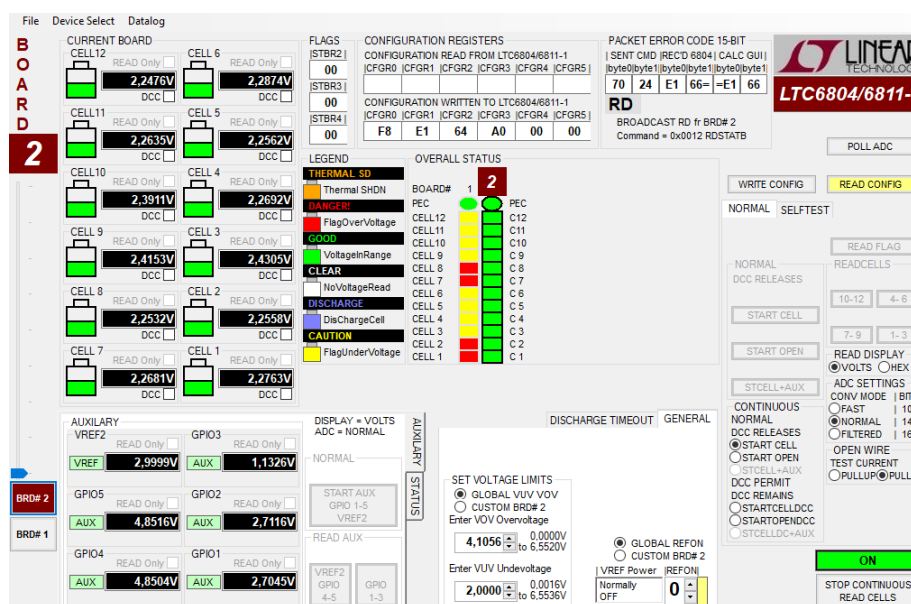


Obr. 3.8: isoSPI komunikace se třemi DC1942B obvody (vlevo), DC2026C (vpravo dole) a mikrokontrolér [Převzato z [23]]

vodů, tak i GUI pro snadnou manipulaci s konfiguračními registry. Téměř plně funkční je z toho důvodu, že současná verze nepodporuje nastavení registrů pro časování vybíjení článků za účelem balancování.

Na obrázku 3.9 můžeme vidět první pohled na prostředí aplikace QuickEval pro LTC6804. Po levé straně jsou okénka s napětím jednotlivých článků s možností DCC. Touto volbou sepneme PMOS tranzistor, který je v sérii se $33\ \Omega$ rezistorem a vybíjíme tak postupně článek. Uprostřed nahoře můžeme dále vidět konfigurační registry. Těmi můžeme ovládat GPIO piny a již zmíněné spínání tranzistorů a časování. Pro kontrolu chyb a příznakových bitů slouží oblast uprostřed níže. Pomocí příznakových bitů můžeme například nastavit příznak, že je na článku napětí, které přesahuje požadovaný rozsah nebo naopak napětí, které je pod požadovaným rozsahem pro daný článek. Pokud obvod zaregistruje nepřipojený vstup u jednoho z článků (zapojení pro méně než 12 článků v sekci 3.3), kontrolní cyklický PEC kód, který bych obvodem obdržel, se nebude shodovat s teoreticky vypočteným v programu a program tak odmítne pokračovat. Po pravé straně jsou obsaženy příkazy pro měření napětí a konfiguraci AD převodníku spolu s kanály, do nichž jsou rozděleny články po třech, které chceme převést. V době pořízení obrázku bylo testováno zapojení se 16 rezistory figurujícími jako články. Síťové napětí je rozděleno mezi zapojené „články“, proto se na desce číslo jedna objevuje napětí vyšší než 4,1056 V a je tak nastaven bit „overvoltage“ (česky „přebíť“), kdežto na desce číslo dva je napětí v okolí 2,25 V.

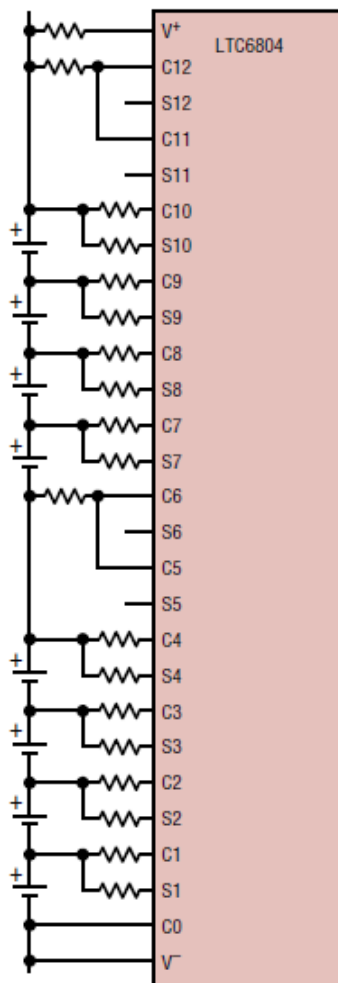
Díky tomuto softwaru bylo jednodušší pochopit funkčnost celého zařízení a vyjasnění si některých nesrovnalostí, které vyvstaly z přečtení dokumentace obvodu. Mezi nesrovnalosti například patřil princip balancování pomocí příkazu „Discharge“. [20], [17]



Obr. 3.9: Ukázka GUI využívané programem QuickEval od Linear Technology [Převzato z [20]]

3.3 Zapojení s méně než 12 články

Pro širší využití správy BMS je třeba se zamyslet nad tím, že nemusí vždy být na daném obvodu připojeno všech 12 článků. Jednak je nevýhodné testovat pro oba obvody 24 článků, stejně tak je pravděpodobné, že pro danou aplikaci nebude potřeba přímo tohoto počtu. V dokumentaci je pro tento případ uvedeno, že napájení, na kterém jsou připojeny články, musí být alespoň 11 V. Pro rychlejší práci s AD převodníky se doporučuje zapojit články symetricky k multiplexerům, čímž dosáhneme rychlejšího čtení. Z obrázku 3.3 víme, že piny C_1 až C_6 patří k jednomu multiplexeru a piny C_6 až C_7 k druhému. Proto je vhodné rozdělit piny na dva díly a ke každému přistupovat odspodu. Nevyužité vstupy jsou následně rovnoměrně rozděleny nad každý z multiplexerů. Pokud je používán lichý počet článků, horní multiplexer by měl mít zapojených článků méně. Nepoužité piny článků musíme vzájemně propojit v rámci jednoho multiplexeru a připojit přes 100 Ω odpor k akupacku. Zapojení s 8 články je vyzobrazeno na obrázku 3.10. [17]



Obr. 3.10: Zapojení s méně než 12 články |Převzato z [17]|

4

Realizace programu pro měření napětí článků a balancování

Po realizaci zapojení 4 vodičů pro SPI komunikaci bylo třeba vytvořit program, který bude automaticky po připojení napájení mikrokontroléru a připojení článků měřit napětí a následně balancovat (více v sekci 4.3.2). Postup programu je následovný:

- Stanovit počet DC1894 obvodů,
- nadefinovat rychlost AD převodníku a zakázat balancování při měření,
- určit, které kanály článků se budou měřit,
- zapsat konfiguraci do konfiguračních registrů,
- provést AD konverzi pro získání hodnot napětí,
- balancovat články.

Abychom mohli vyslat data přes SPI komunikaci, musíme nejprve zařízení s DC1894 probudit shozením signálu CS do nízkého stavu, vyslat do obvodu „dummy byte“, dostat CS signál do stavu „high“ a následně čekat dostatečně dlouhou dobu ($N \cdot t_{WAKE}$), kde N je počet obvodů s DC1894, aby bylo umožněno uvedení obvodů do stavu, kdy je připraveno ke komunikaci. Pro další příkazy ve stejném cyklu bude použit příkaz pro probuzení pouze isoSPI portu. [17]

4.1 Zápis konfigurace a čtení konfigurace

Formát dat pro čtení a zápis konfigurace je závislý na počtu DC1894 obvodů. Formát příkazu pro zápis do konfiguračních registrů je následovný:

- Uvedení signálu CS do nízkého stavu,

- vyslání 2 bytového „WRCFG“ příkazu v hexadecimální podobě a následně jeho cyklického PEC kódu,
- vyslání masky pro šest konfiguračních registrů a jejich PEC kód do posledního obvodu v pořadí,
- vyslání masky pro šest konfiguračních registrů a jejich PEC kód do obvodu zapojeného k mikrokontroléru,
- uvedení CS do stavu „high“.

Pomocí konfiguračních registrů lze naprogramovat časovač pro uspání obvodů, sepnutí pinů pro vybíjení článků v rámci balancování a časovač pro dobu balancování.

Velmi podobným způsobem probíhá i čtení konfigurace. Místo příkazu „WRCFG“ vyšleme příkaz pro čtení konfigurace („RDCFG“) a místo zápisu šesti konfiguračních registrů pro každý obvod budeme tyto registry postupně číst ve stejném pořadí, v jakém byly v předchozím případě zapisovány. Čtení konfigurace předně slouží jako ověření správnosti komunikace. Jako funkce v programu je typu *int* a vrací hodnotu '0' v případě, že se spočtený PEC pomocí funkce pro výpočet na základě konfiguračních registrů shoduje s kódem PEC obdrženým SPI komunikací. Pokud se hodnoty neshodují, funkce vrátí hodnotu '-1' a program tak nebude pokračovat. Pro správnost zápisu a čtení musí být přenášená data stabilní na vzestupnou hranu hodinových pulzů. [17]

4.1.1 Packet error kód - PEC

Kód PEC je cyklická redundanční kontrolní hodnota o patnácti bitech počítaná pro všechny bity v registrech ve směru, ve kterém jsou předávány za použití základové hodnoty 00000000010000 a následného charakteristického polynomu $x^{15} + x^{14} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^4 + x^3 + 1$. V dokumentaci k LTC6804 je postup pro výpočet teoretické hodnoty PEC, která je potřebná k vyhodnocení správnosti příkazu a zároveň ověření připojení vstupů. K tomu slouží předem spočtená tabulka hexadecimálních hodnot (tu si lze vygenerovat jednoduchým postupem dle dokumentace) a bitových posuvů.

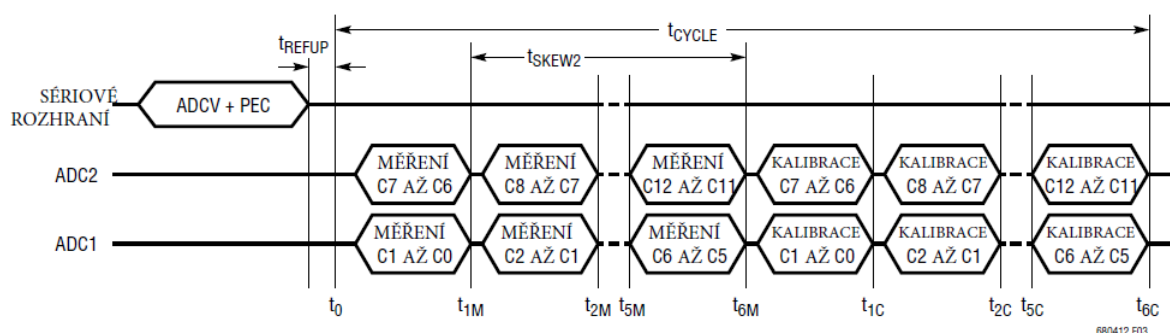
V předchozí části je již uveden účel tohoto kódu, kterým je především kontrola při čtení konfigurace a také při čtení napěťových hodnot jako výstupu AD převodníků. [17]

4.2 Konverze napětí článků na vstupech

Příkazem „ADCV“ je zahájeno měření na vstupech, na kterých jsou připojeny články (piny C_0 a C_{12}). Tímto příkazem je též voleno, které kanály se budou měřit, jelikož články jsou rozděleny do 4 kanálů. Po obdržení příkazu v případě měření všech dvanácti článků, začne první AD převodník sekvenčně měřit spodních 6 článků a druhý AD převodník vrchních 6 článků. Ve chvíli, kdy je měření dokončeno, je každý kanál kalibrován pro

odstranění případných chyb. Doba konverze a výskyt chyb závisí především na definované rychlosti AD převodníku. Po obdržení hexadecimálního příkazu a jeho PEC kódu, je nutno opět čekat na zpracování. Doba mezi odesláním příkazu a počátkem měřícího cyklu je uvedena jako t_{REFUP} a dosahuje maximálně 4.4 ms.

Časování je popsáno na obrázku 4.1, kde je zobrazeno časování pro jednotlivé úkony od zadání příkazu až po měření a kalibraci hodnot. Ačkoliv se jedná o měření všech článků, část je na obrázku vynechána z důvodu úspory. Obrázek 4.2 doplňuje předchozí obrázek o hodnoty pro časy při různých režimech rychlosti AD převodníku. Zde platí ale pravidlo, že s rychlostí roste chybovost měření. [17]



Obr. 4.1: Časování pro ADCV příkaz při měření všech 12 článků |Převzato z [17]|

REŽIM	DOBA KONVERZE (V μ s)								
	t_0	t_{1M}	t_{2M}	t_{5M}	t_{6M}	t_{1c}	t_{2c}	t_{5c}	t_{6c}
27kHz	0	57	103	243	290	432	568	975	1,113
14kHz	0	86	162	389	465	606	742	1,149	1,288
7kHz	0	144	278	680	814	1,072	1,324	2,080	2,335
3kHz	0	260	511	1,262	1,512	1,770	2,022	2,778	3,033
2kHz	0	493	976	2,425	2,908	3,166	3,418	4,175	4,430
26Hz	0	29,817	59,623	149,043	178,850	182,599	186,342	197,571	201,317

Obr. 4.2: Doby konverze pro ADCV příkaz při měření všech 12 článků |Převzato z [17]|

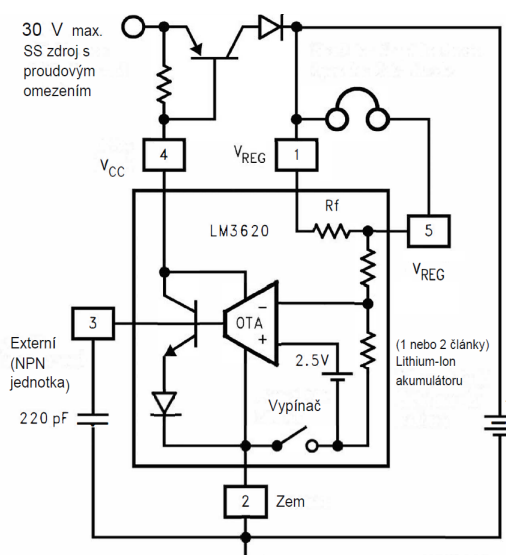
Pro čtení napětí jednotlivých článků slouží příkaz „RDCV“. Tím jsou procházeny registry a následně získány hodnoty jednotlivých článků registrů pro napětí článků. Po vynásobení hodnot registrů číslem 0.0001 pak dostáváme hodnoty napětí.

4.2.1 Příznakové bity hodnoty napětí na článku

LTC6804 disponuje příznakovými bity, jejichž podmínku lze nastavit v konfiguračním registru. Konkrétně se jedná o příznak „overvoltage“ a „undervoltage“. Pokud je napětí na článku menší než hodnota nastavená v registru, nebo pokud je naopak hodnota napětí vyšší, než je stanovená hodnota v registru, je ve stavovém registru nastaven příznak, že je napětí moc vysoké, případně nízké. Tento příznak lze využít u nadřazeného komunikačního zařízení (mikrokontroléru), které na základě tohoto příznaku provede například odpojení baterie od napájení.

4.2.1.1 Nabíjecí obvody pro akumulátory

Jak je zmíněno v kapitole 1, je třeba při nabíjení Li-Ion akumulátorů dodržet zásady, které zamezí zkrácení životnosti baterie a dalším nechtěným jevům. Jednou z těchto zásad je omezení nabíjecího proudu v druhé fázi nabíjení. Při absenci externích nabíjecích zdrojů pro akumulátor je realizace proudového omezení náročná, jelikož námi používaný obvod pro balancování článků touto funkcí nedisponuje. Taktéž by bylo velmi nepraktické celé odpojování akumulátorů realizovat jednoduchým přerušením vedení napájení, neboť by články nebyly efektivně nabity. Zdroj [6] uvádí několik variant obvodů pro správu nabíjení Li-Ion akumulátorů. Jednou z variant je obvod LM3620. Tento obvod je navržen tak, aby zajistil kontrolu nabíjení akumulátoru, a to především v pozdější části nabíjení, kdy je potřeba právě proudové regulace. Jako vstup pro obvod slouží stejnosměrné zdroje napětí v rozmezí od 4 do 30 V. V případě absence zdroje napětí obvod odebírá proud o velikosti 10 nA. Na obrázku 4.3 je typické zapojení obvodu LM3620. Obvod sestává z transkonduktančního zesilovače, referenční „bandgap“ diody, NPN tranzistoru a dolaďovacích rezistorů. [25]



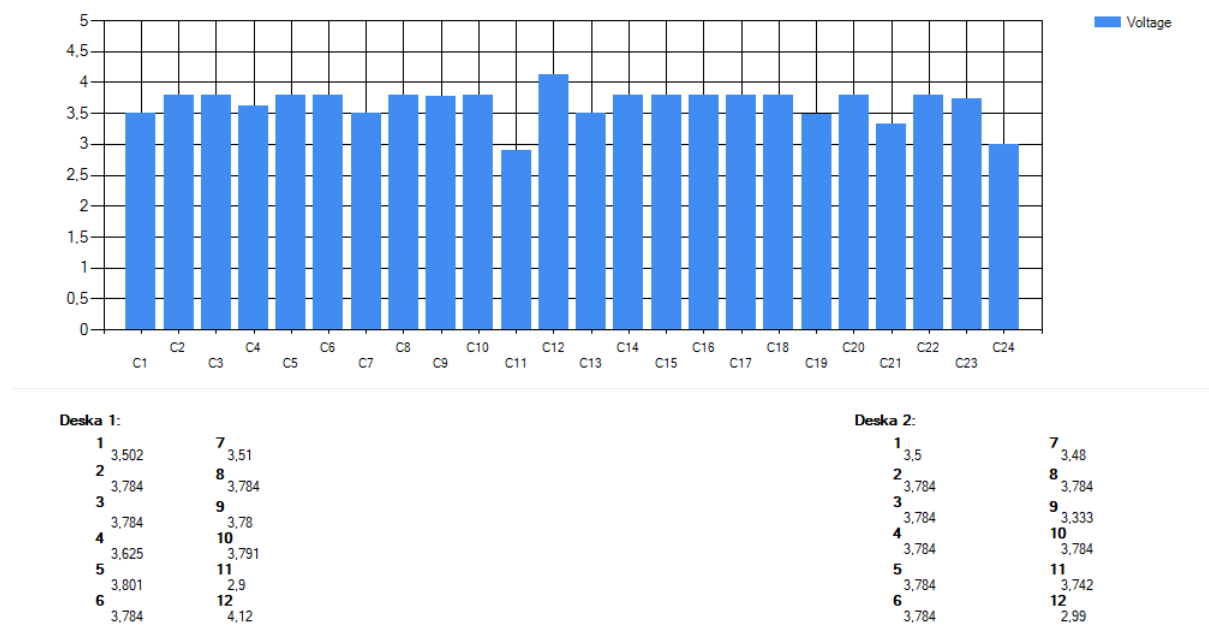
Obr. 4.3: Schéma obvodu LM3620 |Převzato z [25]|

4.3 Sériová komunikace

Sekce 3.1.2 popisuje základy sériové komunikace SPI. Nejprve je tedy poslán kód příkazu a následně data, kterými se nastaví registry. Původně měl být obvod připojen přes sběrnici CAN bus. Bohužel mikrokontrolér MSP430, jak bylo v průběhu práce zjištěno, tento typ komunikace nepodporuje. Proto je vnější komunikace realizována pomocí UART. Hodnoty měřených článků jsou posílány a zachycovány v programu, který slouží jako GUI.

4.3.1 Uživatelské rozhraní

Pro vizualizaci hodnot napětí článků slouží aplikace napsaná v jazyku C# a prostředí Visual Studio. Z hodnot jednotlivých článků získaných sériovou komunikací jsou pak vytvořeny grafy. Obrázek 4.4 zobrazuje uživatelské rozhraní vytvořené pro tento projekt. Napětí jednotlivých článků je zobrazeno na škále ve formě grafu. Konkrétní hodnoty jsou poté pro každou desku zvlášť pod grafem.

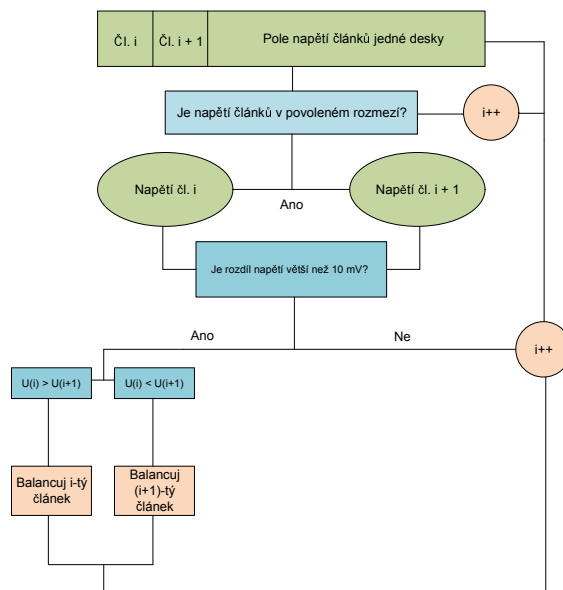


Obr. 4.4: Uživatelské rozhraní pro vizualizaci napětí článků

4.3.2 Balancování článků akumulátoru

Balancování článků u použitého obvodu je založeno na odporovém vybíjení, jak je zmíněno v předchozím textu. Princip tedy spočívá v přepisování „DCCx“ bitů konfiguračních registrů, kde 'x' je číslo článku. Díky tomu je balancování zcela manuální a automatizace je závislá na programátorovi. Obrázek 4.5 ukazuje princip balancování navrženého pro tento projekt. Algoritmus spočívá v porovnávání sousedních napětí článků a reaguje na případný rozdíl větší, než je uvedená hodnota tak, že je přepsán konfigurační registr na začátku cyklu před dalším měřením příkazem „WRCFG“. Prvotně je ověřena podmínka, zda jsou napětí článků v požadovaném rozmezí, jelikož v případě přílišného vybíjení článků způsobeného balancováním, by mělo pro daný článek fatální vedlejší účinky. Další podmínkou je pak ověření nenulovosti napětí sousedních článků. Pokud by tato podmínka nebyla zahrnuta, byl by článek, který je v pořadí vedle nepřipojeného článku (jeví se jako hodnota 0 V) neustále balancován, a to až do minimální povolené hodnoty zahrnuté v první podmínce. Program je koncipován tak, že je potřeba tedy zapojit články vedle sebe. To sice způsobí, že se nevyužije zrychlení v podobě paralelního přístupu dvou

převodníků, nicméně rozšíření algoritmu o porovnání článků, které mají mezi sebou další o nulovém napětí, není vyloučeno.



Obr. 4.5: Blokové schéma navrženého balancování článků

Po dokončení porovnání a případného balancování všech článků na dané desce, se přechází na desku druhou a proces se opakuje. Výchozí nastavení registrů obvodu zakazuje balancování při práci s AD převodníkem. Pokud by balancování bylo povoleno i během měření a převodu hodnot, potýkali bychom se s výskytem chyb v měření, způsobených vybíjecím proudem, které se projeví naměřením nižších napěťových hladin.

V případě, že mezi články je menší rozdíl, než je uvedená hodnota, je balancování těchto článků zakázáno. Zdrojový kód a vytvořený program je obsažen na příloženém CD.

Závěr

Cílem této bakalářské práce byl návrh univerzálního systému správy článků pro Li-Ion baterie, který bude využit pro potřeby fakulty elektrotechnické v Plzni a pro regionální inovační centrum elektrotechniky RICE.

První kapitola práce se zabývá rozdělením a rozbohem nejrozšířenějších druhů akumulátorů vhodných pro elektromobilitu. Nejprve bylo potřeba seznámit se s problematikou Li-Ion akumulátorů a možnými úskalími, které práce s nimi skýtá. Ve druhé kapitole práce je popsán Battery Management System a jeho účel spolu s metodami, kterými lze BMS provozovat. Ve druhé kapitole práce je také řešen výběr systému pro balancování článků, který byl pro daný projekt vyhovující. Výběr probíhal především porovnáním již existujících BMS systémů. Samotný návrh monitorovacího systému je popsán ve třetí kapitole. Tato kapitola se detailně zabývá zapojením obvodu a jeho dílčích částí, stejně tak komunikací jednotlivých zařízení a prvním oživením systému. Ve čtvrté kapitole práce se nachází stěžejní část, která spočívala v programové realizaci komunikace jednotlivých částí systému a balancování článků baterie.

Pro zlepšení efektivity budoucího vývoje projektu, by bylo možné například namísto pasivního balancování využít balancování aktivní. To je založeno na akumulaci energie, která se v případě pasivního balancování maří v teplo. Obvody od Texas Instruments nabízejí takové řešení. Dalším zlepšením by pak mohlo například být rozšíření algoritmu o možnost porovnání napětí na člancích, když nejsou vedle sebe. Pak by bylo možné zapojovat články tak, aby bylo plně využito paralelního převodu. Velmi důležité je také zařazení obvodů pro nabíjení článků, a to především pro jejich funkci snižování nabíjecího proudu, jak je popsáno v sekci 4.2.1.1.

Nyní je navržený systém balancování připraven pro nasazení do reálných aplikací, které se na katedře elektromechaniky a výkonové elektroniky taktéž připravují.

V době zadání práce jsem neměl žádné předchozí praktické zkušenosti s mikrokontroléry ani BMS. Získaných zkušeností je tedy proto nespočet a věřím, že je využiji nejen v budoucím studiu, ale také v budoucích projektech tohoto typu.

Literatura

- [1] *Energie kondenzátoru*. [online] [cit. 21.03.2018]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/235-energie-kondenzatoru>
- [2] BENDA, V., Cetl, T. *Elektrochemické zdroje*. [online] Praha: ČVUT, FEL, A1M13EZF, AD1M13EZF. [Cit. 24.2.2018]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=976>
- [3] CETL, Tomáš. *Aplikace elektrochemických zdrojů*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. 145 s. ISBN 80-01-02859-3.
- [4] *Lithium-iontový akumulátor*. [online] prosinec 2017 [cit. 21.3.2018]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-iontov%C3%BD%20akumul%C3%A1tor>
- [5] BATTEX, spol. s.r.o. *Sérioparalelní spojení (článků nebo baterií)*. [online] Slaný: BATTEX, spol. s.r.o. [Cit. 24.2.2018]. Dostupné z: <http://www.battex.info/slovnicek-a-pojmy/s%C3%A9rioparaleln%C3%AD+spojen%C3%AD+%28%C4%8Dl%C3%A1nk%C5%AF+nebo+bateri%C3%AD%29>
- [6] HAMMERBAUER, Jiří. *Učební texty k předmětu KAE/ENZ*. [online] [cit. 2018-02-28].
- [7] Fronius International GmbH. *Problémy s akumulátory*. [Cit. 2.3.2018]. Dostupné z: <https://www3.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-7929464D-746028EC/fronius%20ceska%20republika/hs.xsl/28%208170.htm#.WphTgOjOWUn>
- [8] McDowall, J. *Understanding Lithium-Ion Technology*. [online] [Cit. 2.3.2018]. Dostupné z: <http://sites.ieee.org/pes-essb/files/2016/06/2015-WM-PN-Understanding-Li-ion-Jim-McDowall.pdf>
- [9] *BU-502: Discharging at High and Low Temperatures*. 25.1.2018 [cit. 3.3.2018]. Dostupné z: <http://batteryuniversity.com/learn/article/discharging%20at%20high%20and%20low%20temperatures>
- [10] *Battery Management System Tutorial*. RENESAS [Cit. 5.3.2018]. Dostupné z: <https://www.intersil.com/content/dam/Intersil/whitepapers/battery-management/battery-management-system-tutorial.pdf>

- [11] Samadi, M.F., Saif, M. *Integrated Battery Management System*. [online] leden 2015, 173-188 [cit. 2018.03.13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/283842696_Integrated_Battery_Management_System?enrichId=rgreq-b775761eb164723e93ebab6602ae7dc0-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI4Mzg0MjY5NjUzBUozMDI3MTU5MTYyMjY1NjJAMTQ0OTE4NDUwNjE1NQ%3D%3D&el=1_x_3&_esc=publicationCoverPdf
- [12] *A comparison of commercially available Li-Ion BMSs*. [online] [cit. 8.3.2018]. Dostupné z: <http://liionbms.com/php/bms`options.php#Digit.`balancers>
- [13] *BMS24T manual*. [cit. 8.3.2018]. Dostupné z: <http://www.chargery.com/doc/Chargery`BMS24T`specification`V1.14.pdf>
- [14] *Mk3 Lithium BMS Spec Sheet*. [online] [Cit. 8.3.2018]. Dostupné z: <http://www.manzanitamicro.com/downloads/category/18-battery-management-systems?download=87%3Alibms>
- [15] *123SmartBMS Instruction manual*. [online] [Cit. 8.3.2018]. Dostupné z: <http://www.123smartbms.com/uploads/file/123SmartBMS`v0`5.pdf>
- [16] WEN, S. *Cell ballancing buys extra run time and battery life*. [online] [cit. 9.3.2018]. Dostupné z: www.ti.com/lit/an/slyt322/slyt322.pdf
- [17] *LTC6804-1/LTC6804-2 Multicell Battery Monitors datasheet*. [online] [cit. 10.3.2018]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/680412fc.pdf>
- [18] Scott, K., B., Nork, S. *Passive Battery Cell Balancing*. [online] [cit. 10.3.2018]. Dostupné z: <http://www.linear.com/solutions/7362>
- [19] Whelan, B. *How to Choose a Voltage Reference*. [online] [cit. 10.3.2018]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/lt-journal/LTMag-V19N1-03-References-BrendanWhelan.pdf>
- [20] *Demo manual DC1894B*. [online] [cit. 29.4.2018]. Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/dsp-documentation/evaluation-kit-manuals/dc1894bfa.pdf>
- [21] *MSP430F551x, MSP430F552x Mixed-Signal Microcontrollers datasheet*. [online] [cit. 29.4.2018]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f5529.pdf>
- [22] *Daisy-Chaining SPI Devices*. [online] [cit. 29.4.2018]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/3947>
- [23] *Getting Started: LTC6804-2 Programming Guide*. [Online] [cit. 12.5.2018].

- [24] *Linduino One Isolated Arduino-Compatible Demonstration Board*. [Online] [cit. 12.5.2018]. Dostupné z <http://www.analog.com/media/en/dsp-documentation/evaluation-kit-manuals/dc2026cfe.pdf>
- [25] *Lithium-Ion Battery Charger Controller*. [Online] [cit. 17.5.2018]. Dostupné z <http://pdf.dzsc.com/0M5/LM3620M5-4'1057274.pdf>
- [26] Pinker, Jiří. *Základy mikrokontrolérů*. Duben 2016. [Online] [cit. 17.5.2018].
- [27] *Jak funguje olovený akumulátor?* [Online] [cit. 22.5.2018]. Dostupné z <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/16090-jak-funguje-oloveny-akumulator>
- [28] *Nikl-kadmiový akumulátor*. [Online] [cit. 22.5.2018]. Dostupné z https://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl-kadmiov%C3%BD_akumul%C3%A1tor
- [29] *Tužkové (AA) akumulátory NiMH 1000mAh*. [Online] [cit. 22.5.2018]. Dostupné z <http://teamc.cz/cz-detail-199786-aa-nimh-akumulator-1000mah-baleni-4ks.html>
- [30] *Li-Ion nabíjecí akumulátor Panasonic 18650 s integrovaným ochranným obvodem*. [Online] [cit. 22.5.2018]. Dostupné z <http://www.eurolamp.cz/li-ion-akumulator-18650-37v-3400mah-panasonic>
- [31] *MK3x12 Digital Lithium Regulator*. [Online] [cit. 12.5.2018]. Dostupné z http://www.manzanitamicro.com/products?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=114&category_id=22&vmcchk=1
- [32] *BMS123 Smart - Complete Set*. [Online] [cit. 22.5.2018]. Dostupné z https://www.ev-power.eu/Battery-Management/BMS123-Smart/123-Smart-BMS-Complete-Set-4-cells-with-Bluetooth-4-0.html?force_sid=qmneh9jmaplmiggj8ibul1sfv4

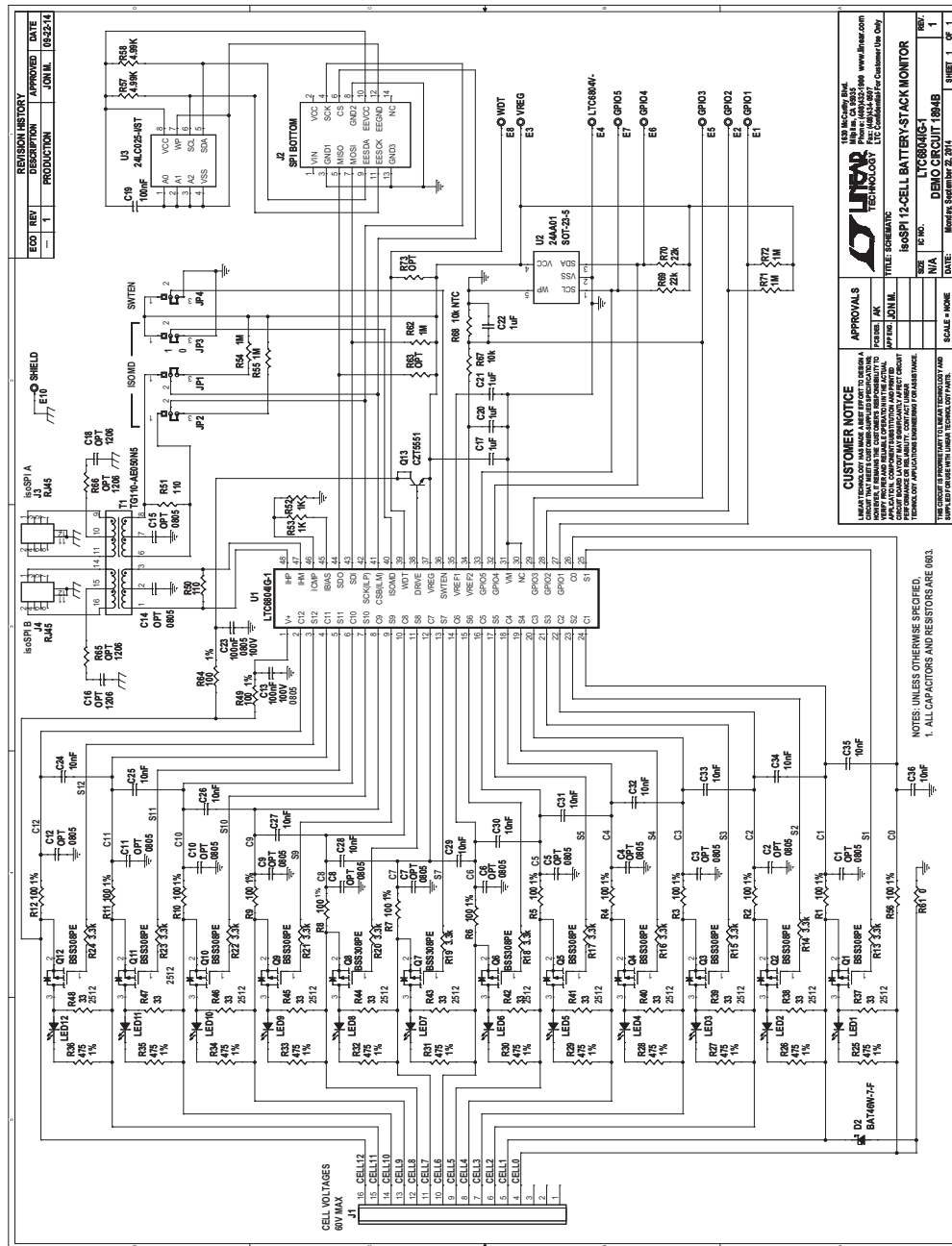
Příloha A

Schémata zapojení

A.1 DC1894B

DEMO MANUAL DC1894B

SCHEMATIC DIAGRAM



REVISION HISTORY ECD REV 1 1 DESCRIPTION PRODUCTION DATE JUN 11 10:25:14	
CUSTOMER NOTICE LINEAR TECHNOLOGY MAKES NO WARRANTY AS TO THE ACCURACY OF THE INFORMATION CONTAINED HEREIN. THE USER'S RESPONSIBILITY TO OBTAIN NECESSARY PERMITS, APPROVALS, AND REGULATORY COMPLIANCE IS THE USER'S RESPONSIBILITY. LINEAR TECHNOLOGY IS NOT RESPONSIBLE FOR ANY DAMAGE OR INJURY TO PERSONS OR PROPERTY.	
APPROVALS TITLE: JON.H. DATE: MONDAY, SEPTEMBER 22, 2014	
SCALE: NONE	
FILE: DEMO.CIR	
LIBRARY: 12-CELL BATTERY STACK MONITOR	
DATE: MONDAY, SEPTEMBER 22, 2014	
SHEET 1 OF 1	

NOTES: UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
 1. ALL CAPACITORS AND RESISTORS ARE 0603



Information furnished by Linear Technology Corporation is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed for its use. Linear Technology Corporation makes no representation that the interconnection of its circuits as described herein will not infringe on existing patent rights.

dc1894bfa

11

Obr. A.1: Schéma zapojení obvodu DC1894B [Převzato z [20]]