



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce

Návrh a realizace Battery Management Systému trakční baterie

**Design and Testing of Battery Management System
of a Traction Battery**

Diplomová práce

Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**

Studijní obor: **Elektrické stroje, přístroje a pohony**

Autor práce: **Bc. Lukáš Ira**

Vedoucí práce: **Ing. Pavel Skarolek**

2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ira** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **434813**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrické stroje, přístroje a pohony**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh a realizace battery management systému trakční baterie

Název diplomové práce anglicky:

Design and Testing of Battery Management System of a Traction Battery

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte studii literatury na téma nabíjení lithioných akumulátorů
2. Sestavte obvodové schéma BMS včetně řídicích obvodů
3. Navrhněte desku plošných spojů BMS zvolených parametrů
4. Otestujte jednotlivé funkce BMS s připojenou baterií akumulátorů

Seznam doporučené literatury:

1. H.J. Bergveld, Battery Management Systems Design by Modeling, 2001
2. Záhlava, V.: Návrh a konstrukce desek plošných spojů. Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha 2005
3. ST Microelectronics Inc., < <http://www.st.com> >

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Skarolek, katedra elektrických pohonů a trakce FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **30.01.2019** Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **20.09.2020**

Ing. Pavel Skarolek
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Pavlu Skarolkovi za vedení mé diplomové práce a poskytované konzultace, které vedly k návrhu zařízení BMS a vypracování mé diplomové práce.

Obsah

Úvod.....	15
1 Battery management systém.....	17
1.1 Obecně o BMS	17
1.1.1 Balanční obvod	18
1.1.1.1 Bateriové úložiště bez balancéru	18
1.1.1.2 Bateriové úložiště s balančním obvodem	19
2 Stanovení požadavků a funkcí BMS	21
2.1 Aplikace navrhované BMS	21
2.2 Obecné požadavky na BMS	22
2.3 Požadavky na BMS dané pravidly MotoStudent	22
2.4 Uživatelské rozhraní a výstupy BMS.....	24
3 Rozbor možností návrhu BMS	25
3.1 Popis technologie článků.....	25
3.1.1 Sekundární články.....	25
3.1.1.1 Nickel Cadmium (NiCd)	26
3.1.1.2 Nickel-Metal Hydride (NiMH).....	26
3.1.1.3 Olovněné akumulátory	27
3.1.1.4 Lithium Ion (Li-ion)	27
3.2 Parametry pro porovnání typů článků	31
3.3 Architektura zařízení BMS	32
3.4 Typy balančních obvodů	32
3.5 Možnosti měření elektrického napětí a teplot	34
3.6 Možnosti měření elektrického proudu	35
4 Návrh a realizace BMS.....	37
4.1 Koncept bateriového úložiště.....	37
4.2 Porovnání dostupných Li-ion 18650 článků	37

4.3	Nabíjení Li-ion článků	43
4.4	Vliv velikosti nabíjecího napětí	44
4.5	Vliv velikosti nabíjecího proudu.....	45
5	Navrhované zařízení BMS	47
5.1	Architektura BMS.....	47
5.2	Typ balančního obvodu	47
5.3	Stanovení hodnoty balančního odporu R_{bal}	48
5.4	Měření analogových veličin.....	50
5.4.1	Měření elektrického napětí a teploty	50
5.4.2	Měření elektrického proudu.....	51
5.5	Řídící člen zařízení BMS	52
5.5.1.1	Vývojový diagram vyhodnocování	53
5.6	Popis komunikace	54
5.6.1	Controller Area Network (CAN).....	54
5.6.2	Serial Peripheral Interface (SPI).....	56
6	Návrh zapojení a DPS prototypu zařízení BMS.....	59
6.1	Návrh prototypu BMS	59
6.2	Testování prototypu zařízení BMS	62
7	Návrh zapojení a DPS zařízení BMS	65
7.1	Specifikace zařízení BMS.....	65
7.2	Návrh zapojení zařízení BMS.....	67
7.3	Struktura řídicího programu.....	70
8	Testování jednotlivých funkcí BMS	73
8.1	Test funkčnosti č. 1 zařízení BMS.....	73
8.1.1	Popis a zhodnocení testu č. 1	73
8.2	Test funkčnosti č. 2 zařízení BMS.....	76
8.2.1	Popis provedení testu č. 2	76

8.2.2	Popis naměřených dat	78
8.2.3	Zhodnocení provedeného testu č. 2	78
8.3	Test funkčnosti č. 3 zařízení BMS	79
8.3.1	Popis provedení testu č. 3	79
8.3.2	Popis naměřených dat	81
8.3.3	Zhodnocení provedeného testu č. 3	81
9	Závěr.....	83
10	Použitá literatura.....	85
11	Seznam citací.....	85
12	Seznam příloh.....	88
12.1	Přílohy v tištěné podobě.....	88
12.2	Přílohy na CD.....	88
13	Seznam obrázků.....	89

Abstrakt:

Cílem této diplomové práce je navrhnout a otestovat zařízení *Battery Management System*, zkráceně *BMS*. Funkcí tohoto zařízení je monitorování stavu jednotlivých článků trakčního bateriového úložiště elektrického motocyklu stavěného v rámci studentské soutěže MotoStudent. Jednotlivé kapitoly diplomové práce jsou řazeny tak, aby odpovídaly skutečnému postupu při návrhu zařízení. Před realizací samotného zařízení BMS byl proveden návrh prototypu, na kterém byla ověřena vhodnost zvolených řešení. Jednotlivé funkce realizovaného zařízení BMS byly úspěšně otestovány. Získaná data z testování jsou prezentována v poslední kapitole práce.

Abstract:

The purpose of this diploma thesis is to design and test an electronic device called *Battery Management System*, shortly *BMS*. Function of this device is to monitor state of cells in the electric motorcycle traction battery storage. This electric motorcycle is being built within student competition called MotoStudent. Individual chapters of this diploma thesis are chronologically sorted to match the real design procedure of BMS device. The chosen solutions were verified on prototype which was built before the realization of final BMS device version. Individual features of the designed device were successfully tested. Data from testing are presented in the last chapter of this thesis.

Klíčová slova:

battery management systém, BMS, článek, bateriové úložiště, balanční obvod, balanční rezistor, integrovaný obvod, mikroprocesor, komunikace, SPI, CAN

Key words:

Battery Management System, BMS, cell, battery storage, balancing circuit, balancing resistor, integrated circuit, microprocessor, communication, SPI, CAN

Seznam zkratek a symbolů:

C (Ah)	kapacita článku
C_{BU} (Ah)	jmenovitá kapacita BU
BU	bateriové úložiště
CC	konstantní elektrický proud (Constant Current)
$cena_I$ (Kč)	cena článku
$cena_{BU}$ (Kč)	cena BU
C_f (nF)	filtrační kondenzátor
CV	konstantní elektrické napětí (Constant Voltage)
E_N (kWh)	jmenovitá energie BU
E_V (kWh)	využitelná energie BU
I (A)	elektrický proud
I_{BAL} (A)	balanční elektrický proud
I_{BU} (A)	elektrický proud z/do BU
I_C (A)	elektrický proud článku
I_{CC} (A)	konstantní nabíjecí elektrický proud
I_{MAX} (A)	maximální elektrický proud
I_{MIN} (A)	minimální hodnota elektrického proudu
I_N (A)	jmenovitý elektrický proud
I_P (A)	měřený elektrický proud bateriového úložiště
k	počet paralelně připojených článků navíc
m_{BU} (kg)	hmotnost BU
m_C (kg)	hmotnost článku
n (kus)	celkový počet článků
OV (V)	hodnota elektrického přepětí
p	počet paralelně spojených článků
P_{BAL} (W)	balanční elektrický výkon
P_{IDEAL} (W)	ideální elektrický výkon
P_N (W)	jmenovitý elektrický výkon jednoho rezistoru
P_{S4R} (W)	elektrický výkon jednoho použitého rezistoru
R (Ω)	elektrický odpor
R_{BAL} (Ω)	balanční elektrický odpor

R_f (V)	filtrační rezistor
R_{VOD} (Ω)	elektrický odpor vodiče
s (kus)	počet sériově spojených článků
t_{BAL} (h)	doba balancování
t_{MAX} (s)	maximální doba nabíjení
T_o ($^{\circ}C$)	teplota okolí
t_{CHARGE} (s)	doba nabíjení článku
T_{RBAL} ($^{\circ}C$)	teplota vybraného balančního rezistoru
T_{REF} ($^{\circ}C$)	referenční hodnota teploty
T_1, T_2 ($^{\circ}C$)	hodnoty teplot získané během testů
U (V)	elektrické napětí
U_{BU} (V)	elektrické napětí BU
U_C (V)	elektrické napětí článku
U_{CC} (V)	konstantní nabíjecí elektrické napětí
U_{CN} (V)	jmenovité elektrické napětí článku
U_{MAX} (V)	maximální (nabíjecí) elektrické napětí
U_{MIN} (V)	minimální elektrické napětí
U_{OUT} (V)	výstupní elektrické napětí proudového čidla
U_{REF} (V)	referenční hodnota elektrického napětí proudového čidla
U_1, U_2, U_3 (V)	elektrická napětí článků získaná během testů
UV (V)	hodnota elektrického podpětí
ΔU_{VOD} (V)	úbytek elektrického napětí na vodiči

Úvod

V současné době dochází k rozvoji elektromobility a předpokládá se, že počet vozidel poháněných elektrickým motorem bude nadále stoupat. Tento trend klade požadavky na rozvoj technologie článků, které jsou používány v bateriových úložištích těchto vozidel. Z důvodu bezpečnosti a také relativně vysoké ceny bateriového úložiště je třeba průběžně monitorovat parametry jednotlivých článků, čímž se docílí prodloužení jejich doby života. Zařízení plnící tuto funkci se obecně nazývá battery management systém, a právě návrh takového zařízení je cílem této diplomové práce.

Navrhované zařízení je určeno k aplikaci na již druhý prototyp závodního elektrického motocyklu, který je kompletně navrhován a následně stavěn studentským týmem „CTU Lions“ z Dopravní fakulty ČVUT v Praze v rámci soutěže MotoStudent. Z tohoto důvodu musí být návrh zařízení uzpůsoben nejen podle obecných požadavků, ale také dle specifických pravidel soutěže.

Návrh battery management systému začínám obecným popisem zařízení včetně jeho částí. Dále zmiňuji požadavky, které jsou na něj kladeny, a podle nich uvádím možná řešení, ze kterých je následně vybráno to nejvhodnější. Součástí této práce je také koncepční návrh bateriového úložiště zmíněného elektrického motocyklu a výběr konkrétního typu článku. Před návrhem konečného zařízení battery management systému je provedeno ověření zvolených řešení na prototypu. V závěru práce pak uvádím test základních funkcí navrženého zařízení.

1 Battery management systém

V první kapitole mé práce uvádím základní popis zařízení battery management systému, jeho vlastnosti, funkce a činnost. Dále pak objasňuji princip balančního obvodu (označovaného také jen jako balancér) společně s důvodem jeho použití, funkcemi a typy.

1.1 Obecně o BMS

Battery management systém (zkráceně BMS) je v obecném pojetí jakékoliv zařízení, které v čase monitoruje hlavní provozní parametry sekundárních článků a vyhodnocuje jejich aktuální stav. V případě překročení přednastavených hodnot limitů provozních parametrů zařízení BMS vykoná, na základě logického řízení, adekvátní akci, a tím zajistí především bezpečnost zařízení, ve kterém je instalováno. Dále BMS prodlužuje svou činností životnost bateriového úložiště, neboť nedochází k nepříznivým provozním stavům.

Zmiňovanými hlavními provozními parametry jsou elektrické napětí článku U_C , teplota článku T_C a celkový elektrický proud odebíraný/dodávaný z/do bateriového úložiště I_{BU} , případně proud odebíraný/dodávaný z/do článku I_C .

Příkladem akce, kterou BMS musí podniknout, je odpojení bateriového úložiště od zátěže, a to v případě dosažení spodního limitu pro napětí U_{MIN} či překročení hodnoty maximálního odebíraného proudu I_{MAX} . Dalším příkladem je deaktivace nabíjecího systému při dosažení požadovaného napětí U_{MAX} .

Krom již zmíněných vlastností lze účel BMS obecně rozdělit do následujících bodů:

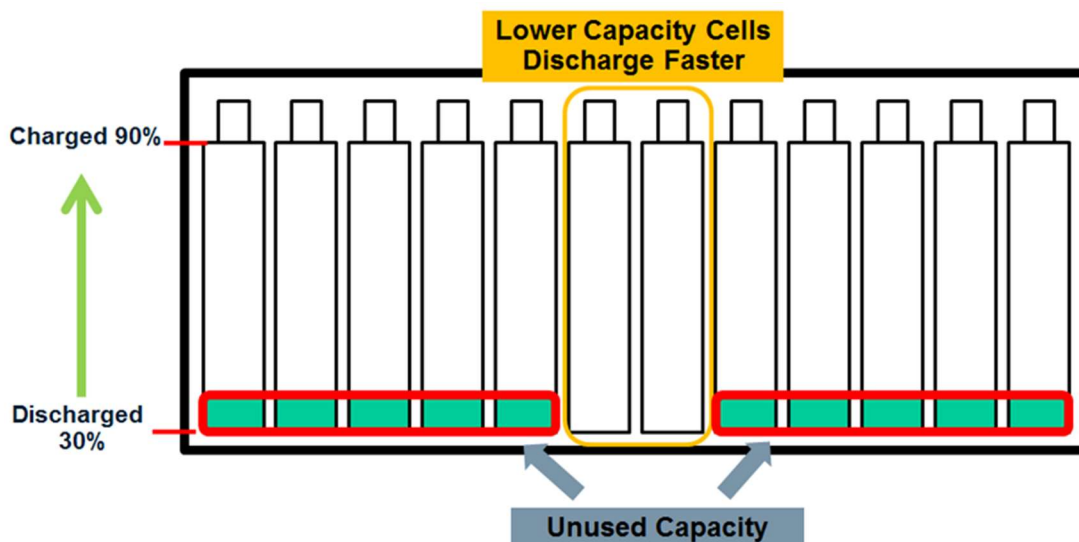
- získávání a zpracování dat,
- monitorování stavu článku,
- „electrical management“ - řízení nabíjení/vybíjení či (omezení) výkonu článku,
- ochrana a bezpečnost bateriového úložiště,
- komunikace, předávání dat. [1]

1.1.1 Balanční obvod

Zařízení BMS může být krom měřicí a řídicí části tvořeno také balančním obvodem, který rozšiřuje jeho možnosti. Hlavním cílem balancéru je, jak už název napovídá, vybalancovat hodnotu elektrického napětí jednotlivých článků na stejnou úroveň. Uplatňuje se v bateriových úložištích, která jsou tvořena sériovým spojením článků.

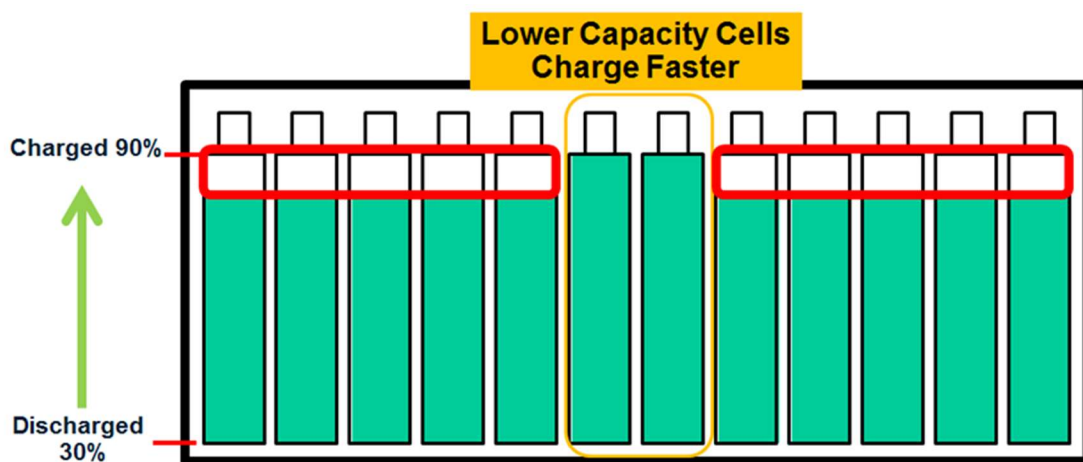
1.1.1.1 Bateriové úložiště bez balancéru

Pokud je bateriové úložiště složeno z více článků zapojených sériově, nedochází zpravidla k jejich rovnoměrnému nabíjení a vybíjení během jednotlivých provozních cyklů. V praxi to znamená, že pokud dojde k vybití jednoho článku pod hladinu napětí U_{MIN} , která je považována za nejnižší přípustnou, musí z důvodu bezpečnosti zařízení a nezkracování doby života článků dojít k odpojení zátěže, i když ostatní články v sériovém zapojení této hodnoty ještě nedosáhly. Články, jejichž napětí je větší než hodnota U_{MIN} , obsahují nevyužitou energii označenou na *obrázku 1* jako “Unused Capacity”.



Obrázek 1: Názorné zobrazení nevyužité energie při vybití jen některých článků [3]

Obdobná situace je při nabíjení, které musí být ukončeno poté, co jeden ze sériově spojených článků dosáhne hladiny napětí U_{MAX} , která je považována za maximální bezpečnou (přebíjení snižuje životnost článků a bezpečnost jejich použití). To má za následek, že plně nenabitě články uchovávají méně elektrické energie, než by mohly při řádném nabití, tj. na jmenovitou hodnotu napětí. Množství nevyužitelné energie narůstá s počtem cyklů nabití/vybití. Názorně je popisovaný problém zachycen na obrázku 2.



Obrázek 2: Názorné zobrazení neúplného nabití většiny článků [3]

1.1.1.2 Bateriové úložiště s balančním obvodem

Použití balančního obvodu zvyšuje množství využitelné energie E_V z teoretického jmenovitého množství uloženého v jednotlivých člancích E_N . Pokud při nabíjení dosáhne jeden ze článků napěťové hladiny U_{MAX} , která je považována za maximální přípustnou, dojde k sepnutí balancéru a přebytečná energie je přeměrována mimo daný článek, což umožní plné nabití všech článků bateriového úložiště.

Existují dva základní typy balančních obvodů, které se liší způsobem využití přebytečné energie. První z nich je pasivní balanční obvod, který je tvořen rezistorem a přebytečnou energii z „více nabitého“ článku přeměňuje na teplo. Druhým typem je aktivní balanční obvod, který přebytečnou energii ukládá do ostatních „méně nabitých“ článků.

2 Stanovení požadavků a funkcí BMS

V této kapitole uvádím požadované vlastnosti a funkce, které by navrhované zařízení BMS mělo splňovat a poskytovat svému uživateli. Určení těchto parametrů je nezbytnou součástí postupu návrhu zařízení, neboť z nich bude vycházet následný výběr a přizpůsobení jednotlivých funkčních celků, ze kterých se BMS skládá.

2.1 Aplikace navrhované BMS

Funkce a vlastnosti řešené BMS budou primárně přizpůsobeny pro trakční bateriové úložiště elektrického závodního motocyklu a po svém dokončení bude toto zařízení BMS součástí elektrické výzbroje již druhého prototypu tohoto motocyklu, který je v rámci studentské soutěže *MotoStudent* kompletně navrhován a stavěn týmem *E-CTU Lions* z Dopravní fakulty ČVUT v Praze.



Obrázek 3: Elektrický závodní motocykl postavený týmem E-CTU lions [4]

Každý tým, který se účastní této celosvětové studentské soutěže konané jednou za dva roky ve Španělsku obdrží základní sadu komponent pro motocykl obsahující součásti jako elektrický motor, měřič izolace či ráfky kol. Týmy pak musí samy navrhnout a

postavit motocykl dle daných pravidel a požadavků. Součástí tohoto studentského projektu není pouze technická část, ale týmy musí předkládat i zprávy zaměřené na ekonomickou stránku stavby motocyklu.

2.2 Obecné požadavky na BMS

Hlavní funkcí zařízení BMS je monitorování stavu jednotlivých sériově zapojených článků, které tvoří bateriové úložiště. BMS tedy musí měřit nejen následující veličiny:

- elektrické napětí článků U_C ,
- elektrický proud I_{BU} odebíraný/dodávaný z/do úložiště,
- teplotu článků T_C ,

ale i vykonávat adekvátní akce na základě naprogramovaného logického řízení:

- spínání balančního obvodu,
- vydání povelu k odpojení bateriového úložiště od zátěže,
- odpojení nabíječky od bateriového úložiště.

Z těchto požadavků plyne nutnost stanovit počet vstupů pro měření elektrického napětí a teploty. Pro určení počtu napěťových vstupů je nejprve nutné znát maximální dovolené napětí bateriového úložiště U_{BU} a typ článku, který bude použit. Tímto se zabývám v následující kapitole. Počet vstupů pro měření teploty je dán pravidly soutěže MotoStudent. Měřená hodnota proudu I_{BU} bude pouze jedna (silový výstup bateriového úložiště).

2.3 Požadavky na BMS dané pravidly MotoStudent

Dle pravidel soutěže MotoStudent pro ročník 2019/2020 je maximální povolené napětí bateriového úložiště U_{BU} omezeno na hodnotu 126 V. Pro konkrétní určení počtu měřících napěťových vstupů je třeba nejprve vybrat typ článků z nichž bude bateriové úložiště složeno, neboť jednotlivé typy mají odlišné hodnoty jmenovitého napětí. Minimální počet teplotních čidel je určen na 4 pro celé bateriové úložiště. [5]

Hodnota špičkového elektrického proudu odebíraného z bateriového úložiště není přímo specifikována, ale bude omezena maximálními dovolenými hodnotami proudového zatížení ostatních komponent trakčního systému, tj. elektrickým měničem a motorem. Hodnota maximálního přípustného proudu není v době návrhu zařízení BMS známa, ale dle zkušeností z minulého ročníku bude uvažována v rozmezí 300 A až 400 A. Znalost této hodnoty je důležitá pro výběr proudového senzoru.

Požadavkem na BMS ze strany pořadatelů soutěže je elektrické oddělení obvodu bateriového úložiště, které je považováno za „High Voltage system“, od části „Low Voltage System“ tvořené elektrickými zařízeními napájenými stejnosměrným napětím rovným nebo menším než 40 V. Doslovné znění pravidel vztahujících se k tomuto tématu je následující:

„D.5.1.3 If any part or piece of the HVS and the GLVS must be together inside a container, they must respect the minimum separation distance according to the table below, except in the exceptional cases described in Art. D.5.1.4 and Art. D.5.1.5:

HVS Voltage	Separation distance
< 100 VDC	10 mm
≥ 100 VDC	20 mm

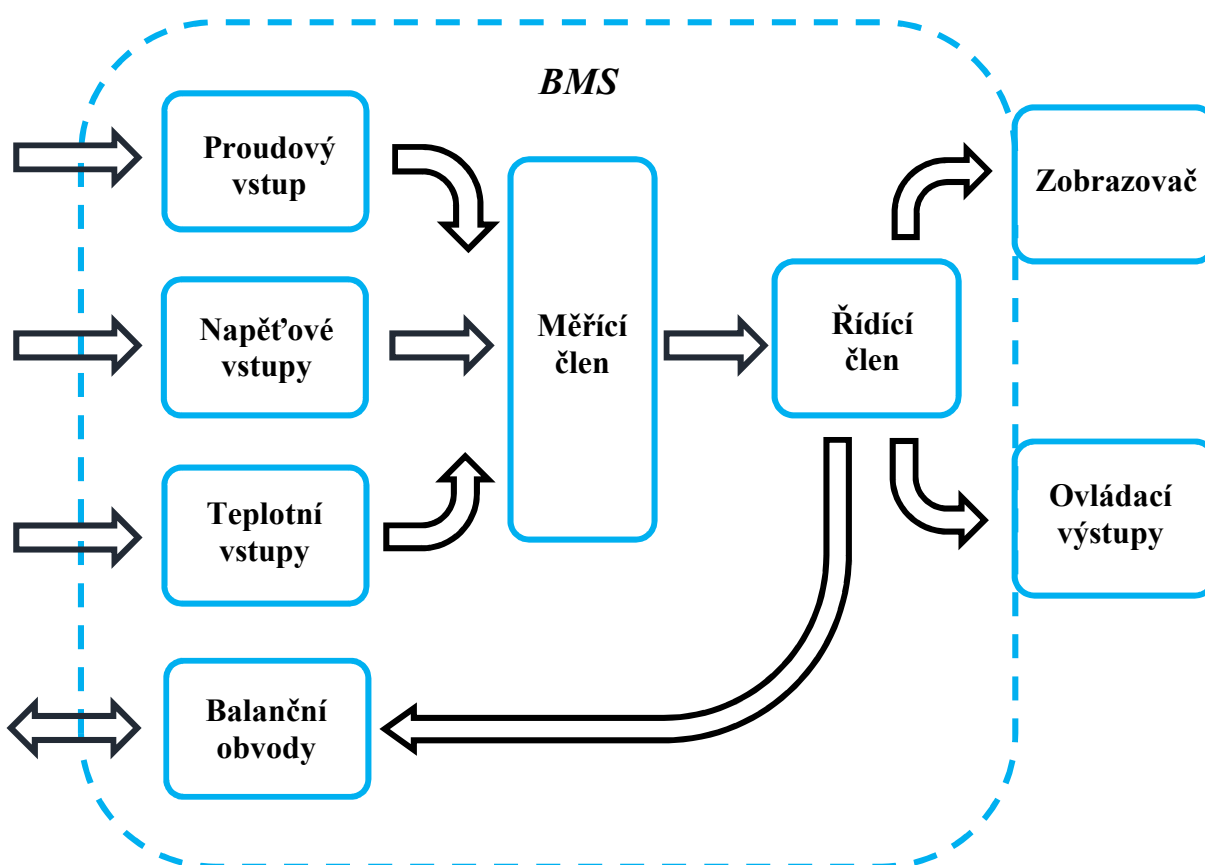
D.5.1.4 Distances indicated in Art. D.5.1.3 shall not apply if the components of the HVS and the GLVS are separated by a humidity insulating barrier with a temperature resistance degree of 150 °C or higher.

D.5.1.5 If some parts or pieces of the HVS and the GLVS should be installed in the same PCB board, they shall be placed in clearly differentiated areas, marked as such on the board. They shall be separated by at least 6.4 mm over the surface, 3.2 mm through the air and 2 mm if they are under coating (these distances may not be respected in cases of optocouplers with a rated voltage equal or higher than the voltage of the HVS).” [5]

2.4 Uživatelské rozhraní a výstupy BMS

Je vhodné, aby zařízení BMS komunikovalo s uživatelem a předávalo mu naměřená data podávající informace o stavu monitorovaného bateriového úložiště. Nejvhodnější volbou je zobrazování hodnot na displeji umístěném na palubní desce (v případě elektrického motocyklu). Aby toto bylo možné, je třeba informace z měřicího obvodu předávat po datové sběrnici směrem k řídicí jednotce a dále na zobrazovač.

Krom komunikace jsou také důležité ovládací výstupy pro vydání pokynu k odpojení zátěže od úložiště či ovládání interní/externí nabíječky bateriového úložiště. Pro hledání příčin poruch, diagnostiku zařízení či hledání optimálního nastavení je žádoucí, aby naměřená data byla ukládána do paměti. Na následujícím obrázku je graficky znázorněno základní funkční schéma zařízení BMS:



Obrázek 4: Základní funkční schéma zařízení BMS

3 Rozbor možností návrhu BMS

V předchozí kapitole jsem stanovil obecné, ale již i konkrétní požadavky kladené na navrhované zařízení BMS. V následujícím textu uvádím popis technologie článků a průřezem jejich dostupných typů. Kapitola dále obsahuje rozbor možných řešení pro splnění stanovených dílčích požadavků a funkcí zařízení BMS.

3.1 Popis technologie článků

Nejzákladnější rozdělení článků je na primární a sekundární. Primární články, jak už název napovídá, jsou určeny k jednorázovému použití, neboť jejich technologie neumožňuje opětovné nabíjení, a jsou tedy logicky pro aplikaci v trakčním bateriovém úložišti nepoužitelné. Proto se dále budu zabývat pouze články sekundárními.

3.1.1 Sekundární články

Sekundární akumulátory jsou taktéž často nazývány „nabíjecí baterie“. Ukládání energie do článků je založeno na elektrochemickém principu, kdy při nabíjení dochází k přeměně elektrické energie na energii chemickou. Nabíjecí elektrický proud procházející článkem způsobuje vratné chemické změny, které se navenek projevují jako rozdíl chemických potenciálů. Při vybíjení se následně odebírá elektrická energie na úkor energie chemické.

Nejrozšířenější typy článků (dle materiálu) jsou:

- Nickel Cadmium (NiCd),
- Nickel-Metal Hydride (NiMH),
- Olovněné akumulátory (Lead Acid),
- Lithium Ion (Li-ion).

3.1.1.1 Nickel Cadmium (NiCd)

Vývoj NiCd článků započal již na začátku 20. století, ale k většímu nasazení tohoto typu článku došlo během druhé světové války, kdy se začaly využívat v leteckých aplikacích, a to díky své schopnosti dodání velkého výkonu po krátký časový úsek. [6]

Články tohoto typu vynikají svou schopností udržet si jmenovité napětí U_N a kapacitu C_N při nízké četnosti dodávání energie do systému který napájí. K dalším výhodám patří jejich odolnost vůči těžkým provozním podmínkám, možnost rychlého nabíjení, vysoký počet nabíjecích a vybíjecích cyklů, dobrá výkonnost při nízkých teplotách, ekonomičnost a v neposlední řadě také dostupnost v široké škále provedení. Díky těmto vlastnostem jsou NiCd články velmi spolehlivé a mají dlouhou dobu života.

Na druhou stranu se u nich vyskytuje tzv. paměťový efekt, který vzniká, pokud nejsou články periodicky zcela vybíjeny, a projevuje se zmenšením jmenovité kapacity C_N . Také relativně malá hustota energie ρ_E se může jevit jako nevýhoda, ovšem záleží na konkrétní aplikaci. Skutečnost, že obsahují toxické látky, vede k redukcí jejich používání. [7][8]

3.1.1.2 Nickel-Metal Hydride (NiMH)

Dalším typem článku je nickel-metal hydridový, který se na začátku 21. století stal jedním z nejpoužívanějších akumulátorů a díky svým vlastnostem začal nahrazovat NiCd články. Vlivem vyšší energetické hustoty jsou tyto články používány tam, kde je požadován zvýšený výkon.

V porovnání s nikl kadmiovými články mohou mít dvakrát větší kapacitu C_N při stejné velikosti a dosahují hustoty energie ρ_E lithium-iontových článků. [8] Na rozdíl od NiCd článků netrpí paměťovým efektem. Další výhodou je, že NiMH články jsou šetrnější k přírodě, neboť neobsahují toxické kadmium.

K hlavním nevýhodám patří menší počet cyklů, zvláště pokud jsou baterie vybíjeny proudy vyššími než jmenovitými. Největší počet cyklů je dosažen, pokud jsou články vybíjeny proudem do 0,5 C. Nevýhodou je také větší vývin tepla při nabíjení, delší čas potřebný k úplnému nabití a vyšší úroveň samovybíjení (o 50 % víc než NiCd). Tyto články je třeba skladovat při nižších teplotách a při úrovni nabití kolem 40 % hodnoty jmenovité kapacity. [7][8]

3.1.1.3 Olovněné akumulátory

Olovněné akumulátory jsou nejstarším komerčně využívaným typem článků. Princip olovněného akumulátoru byl popsán již v 50. letech 19. století. Díky svým vlastnostem našly uplatnění především jako zdroje palubního napětí v osobních a nákladních vozidlech. Dále se krom automobilového průmyslu často používají ve stacionárních úložištích elektrické energie. Příkladem může být úložiště energie vyrobené solárními panely. Jejich hlavní výhodou je relativně nízká cena, dále pak jednoduchá údržba, vysoká spolehlivost, nízká úroveň samovybíjení a schopnost odebírání vysokých proudů.

Nízká hustota energie ρ_E patří k největší nevýhodě těchto článků. Olovněné články mají omezený počet cyklů do úplného vybití a spíše jim vyhovuje častá, ale nízká úroveň vybíjení. Další nevýhodou je neekologičnost elektrolytu a olovněných elektrod. [7][8]

3.1.1.4 Lithium Ion (Li-ion)

Li-ion označuje skupinu článků, které sdílejí některé společné vlastnosti, ale jejich chemické složení se liší. Mezi běžně používané zástupce této skupiny patří články s chemickým složením LiMn_2O_4 , LiFePO_4 či Li_2TiO_3 . První komerčně prodávané nabíjecí Li-ion články uvedla na trh v roce 1991 společnost Sony Corporation. Tyto články byly určeny pro aplikace v mobilních telefonech. [9]

Skupina Li-ion článků v současnosti disponuje velkým potenciálem pro použití v elektrických vozidlech. Hustota energie ρ_E těchto článků je v porovnání s NiCd články téže velikosti až pětinasobná. [11] Plochý průběh vybíjecí charakteristiky Li-ion článku je příznivý, neboť umožňuje efektivní využití kapacity C_N , jejíž hodnota je ze všech zmiňovaných typů článků nejvyšší, stejně jako počet cyklů. Nízký vnitřní odpor, kterým Li-ion článek disponuje, je důležitý z hlediska tepelných vlastností. Čím menší je vnitřní odpor, tím větší elektrický proud může článek dodávat za podmínky stejného oteplení. Dalšími výhodami jsou nenáročnost na údržbu, absence paměťového efektu a také nízká úroveň samovybití ve srovnání s ostatními typy. [7][8]

Navzdory všem výhodám má i Li-ion článek své nevýhody. K bezpečné funkci potřebuje ochranný obvod, který měří přinejmenším jeho elektrické napětí U_C . Dále je také vhodné monitorovat teplotu a případně elektrický proud článku. Problémem Li-ion článků je také stárnutí, které se dá zpomalit omezením pracovních podmínek. Takovým příkladem je omezení hloubky vybití a také koncového nabíjecího napětí článku. Dá se tedy říci, že „odolnost“ tohoto typu článku je v porovnání s předchozími typy nižší. Li-ion články sice neobsahují toxické látky, ovšem jejich hlavním materiálem je lithium, které se řadí mezi poměrně vzácné prvky, s čímž souvisí vyšší cena článků. [7][8]

LMO články (LiMn_2O_4)

LMO články, též označované jako IMR (Lithium-Ion Manganese Rechargeable), jsou komerčně používané od roku 1996. Tento typ článku má jmenovité napětí 3,7 V a disponuje nízkou hodnotou vnitřního odporu, což umožňuje rychlé nabíjení a relativně velké proudové zatížení článku, např. 10 C (článek v provedení 18650). Mezi další výhody patří teplotní stabilita a bezpečnost použití. Příkladem aplikace těchto článků je jejich využití v elektrickém nářadí či lékařských přístrojích. [10]

LFP články (LiFePO_4)

Možnost použití sloučeniny FePO_4 jako katody Li-ion článku byla objevena v roce 1996. Hodnota jmenovitého napětí tohoto článku činí 3,2 V. Výhodou tohoto typu Li-ion článků je nízký vnitřní odpor (obdobně jako u ostatní článku typu Li-ion), relativně vysoké proudové zatížení a větší počet cyklů oproti LMO. Mezi další výhody patří tepelná stabilita a bezpečnost použití. Tyto články můžeme najít v přenosných i stacionárních aplikacích, kde je třeba dodávat relativně vysoké proudy a je požadována zvýšená odolnost. [10]

LTO články (Li_2TiO_3)

Technologie Li-ion článků s Ti_5O_{12} jako materiálem anody jsou známé od roku 1980. Hlavním znakem tohoto typu článku je jmenovité napětí 2,4 V. Mezi jeho výhody patří možnost rychlého nabíjení a proudového zatížení až 10 C. LTO články jsou bezpečné a mají schopnost udržet si kapacitu i při nízkých teplotách (80 % z C_N při -30°C). Častá aplikace LTO článků je např. v UPS (záložních zdrojích energie) či elektrických vozidlech. [10]

Tabulka 1: Porovnání hlavních typů Li-ion článků [10]

typ	U_N (V)	U_{MAX} (V)	ρ_E (Wh/kg)	Počet cyklů
LMO	3,7	4,2	100-150	300 - 700
LFP	3,2	3,65	90-120	1000 - 2000
LTO	2,4	2,85	50-80	3000 - 7000

V následující tabulce jsou shrnuty vlastnosti jednotlivých technologií článků společně s typickými hodnotami charakteristických parametrů. [7][8]

Tabulka 2: Parametry běžných sekundárních článků [7]

<i>parametr/technologie</i>	<i>NiCd</i>	<i>NiMH</i>	<i>Lead Acid</i>	<i>Li-ion</i>
Hustota energie (Wh/kg)	45-80	60-120	30-50	150-250 ^[11]
Vnitřní odpor pro bateriový pack (Ω)	0,1 až 0,2 ¹ (6V pack)	0,2 až 0,3 ¹ (6V pack)	<0,1 ¹ (12V pack)	0,15 až 0,25 ¹ (7.2V pack)
Počet cyklů	1500	300 až 500 ^{2,3}	200 až 300 ²	500 až 1000 ³
Tolerance přepětí	průměrná	nízká	vysoká	velmi nízká
Samovybíjení/měsíc	20 % ⁴	30 % ⁴	5 %	10 % ⁵
Napětí článku [V]	1.25 ⁶	1.25 ⁶	2	3.6
Proud článku špičkový	20C	5C	5C ⁷	>2C
Proud článku jmenovitý	1C	< 0.5C	0.2C	<1C
Provozní teplota [°C]	-40 až 60	20 až 60	-20 až 60	-20 až 60

1. Vnitřní odpor bateriového packu závisí na jeho napětí, typu ochranného obvodu a počtu článků. Ochranný obvod Li-ion je typicky 100mΩ.
2. Počet cyklů závisí na údržbě. Špatná údržba snižuje celkovou životnost.
3. Počet cyklů je dán také hloubkou vybití článku. Menší úroveň vybití zaručuje delší životnost.
4. Samovybíjení je největší bezprostředně po nabití. NiCd články sniží kapacitu o 10% za prvních 24 hodin, následně kapacita klesá o 10% za 30 dní. Úroveň samovybíjení roste s rostoucí teplotou.
5. Interní ochranné obvody typicky spotřebovávají 3 % kapacity článku za měsíc.
6. 1,25 V je hodnota naprázdno.

3.2 Parametry pro porovnání typů článků

Bateriové články jsou charakterizované skupinou parametrů, které určují jejich použití, neboť rozdílné aplikace mají odlišené požadavky. Například pro článek v mobilním telefonu je důležitý vysoký počet cyklů v porovnání se stacionárními záložními zdroji. Základní údaje popisující vlastnosti článků jsou následující:

- elektrická energie uložená v článku (kapacita) C ,
- počet cyklů nabití a vybití,
- jmenovité napětí článku U_{CN} a jmenovitý vybíjecí proud I_N ,
- cena.

Nejvíce používaným typem článků pro bateriová úložiště v elektromobilech či elektrických kolech jsou Li-Ion články v provedení 18650. Články jsou válcovitého tvaru a typový název označuje jejich rozměry, tj. 18 mm v průměru a 650 mm na výšku. Tyto články se spojují do série pro dosažení požadované úrovně napětí U_{BU} a paralelně pro dosažení maximální požadované hodnoty proudu I_{BU} . Celkové zapojení se označuje $XsYp$, kde X označuje počet sériově spojených článků a Y počet paralelně spojených článků, např. 14s5p.

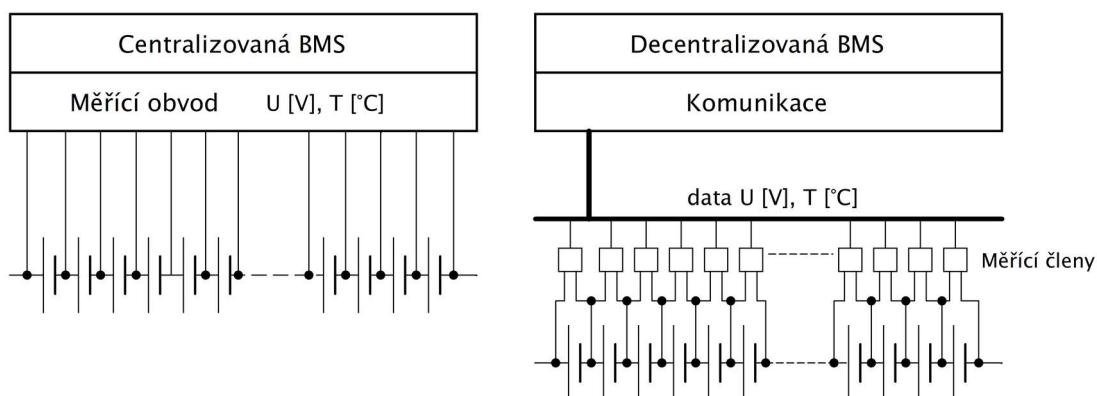


Obrázek 5: Vlevo příklad Li-Ion 18650 článku [12], vpravo bateriové úložiště Tesla 96s46p [13]

Pro lepší porovnávání jednotlivých typů se některé parametry často udávají vztažené na jednotku hmotnosti či objemu, například Wh/kg či Kč/kg. Této možnosti využívám v následující kapitole pro výběr konkrétního typu článku, na který bude BMS navrhována.

3.3 Architektura zařízení BMS

Dle architektury zapojení můžeme rozlišit centralizované a decentralizované typy zařízení BMS. V prvním případě je měření hlavních veličin všech článků bateriového úložiště umístěno společně s řídicí částí BMS. Hlavní nevýhodou toho zapojení je vedení jednotlivých vodičů od článků k řídicí a měřicí části BMS. Druhý, decentralizovaný typ je založen na umístění měření na samotný článek a měřené hodnoty jsou posílány přes komunikační rozhraní. Výhodou je ušetření vodičů a možnost rozšíření systému. Nevýhodou může být rušení komunikační sběrnice.

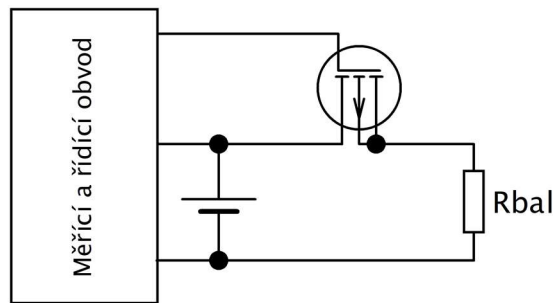


Obrázek 6: Schématické znázornění centralizované (vlevo) a decentralizované (vpravo) BMS

3.4 Typy balančních obvodů

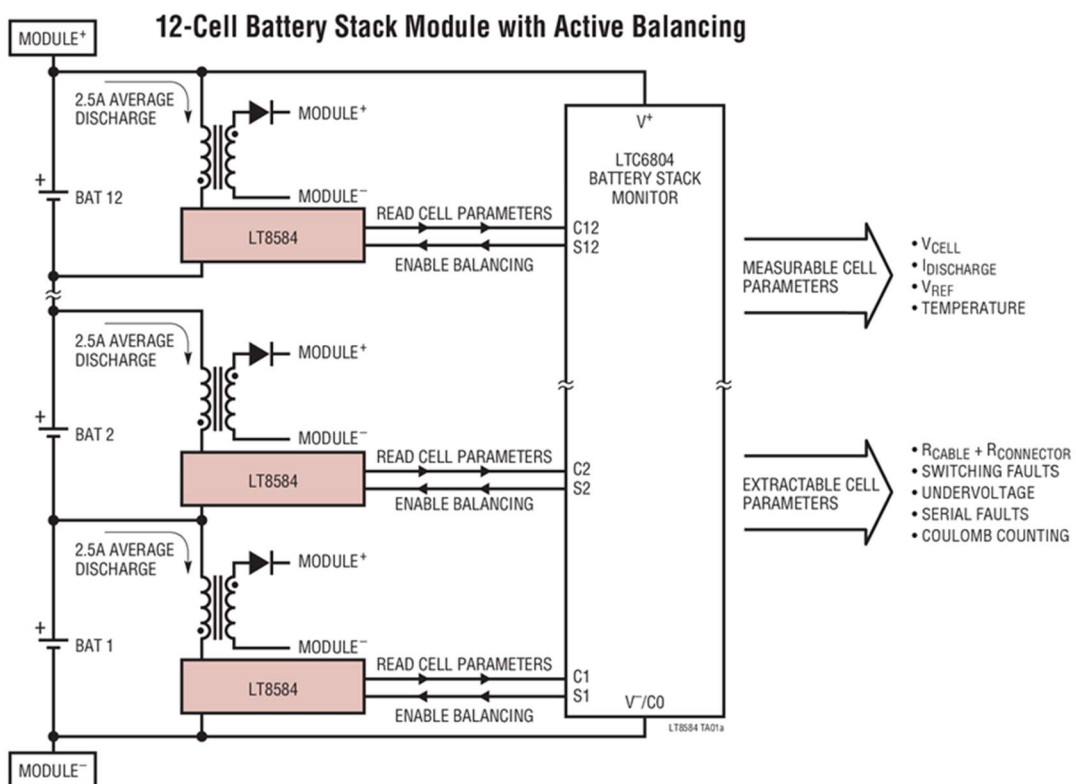
Balanční obvody můžeme z hlediska využití přebytečné energie více nabitých článků rozdělit na dva typy, a to na pasivní a aktivní.

Pasivní typ má výhodu ve svém jednoduchém principu a z toho plynoucí nenáročné konstrukci. Jeho balanční systém se skládá z pasivní součástky (rezistoru), spínacího prvku (tranzistoru) a řídicího obvodu (mikroprocesoru). Řídicí obvod zpracovává informaci o hodnotě napětí článku a pokud přesáhne nastavený práh, vydá logický signál, který sepne tranzistor, čímž dojde k elektrickému spojení rezistoru a článku. Na rezistoru pak dochází k jednoduché přeměně elektrické energie na teplo. Přebytečná energie je tedy nevyužita. Základní schéma pasivního balancéru je na následujícím obrázku.



Obrázek 7: Schéma zapojení pasivního balancéru

Aktivní balanční obvod je oproti pasivnímu typu komplexnější, z čehož vyplývá i jeho složitější konstrukce, cenová relace a teoreticky menší spolehlivost. Aktivní balancér je založen na redistribuci přebytečné energie z více nabitých článků do článků méně nabitých, a to jak při vybíjení, tak i při nabíjení. Při nabíjení není přebytečná energie „mařena na teplo“, ale dochází k jejímu využití, čímž se zvětšuje množství využitelné energie bateriového úložiště. Dalšími výhodami aktivního balancéru oproti pasivnímu je, že zvyšuje čas, po který může napájené zařízení pracovat, a naopak snižuje čas nabíjení a množství tepla vyvíjeného během balancování. [2]

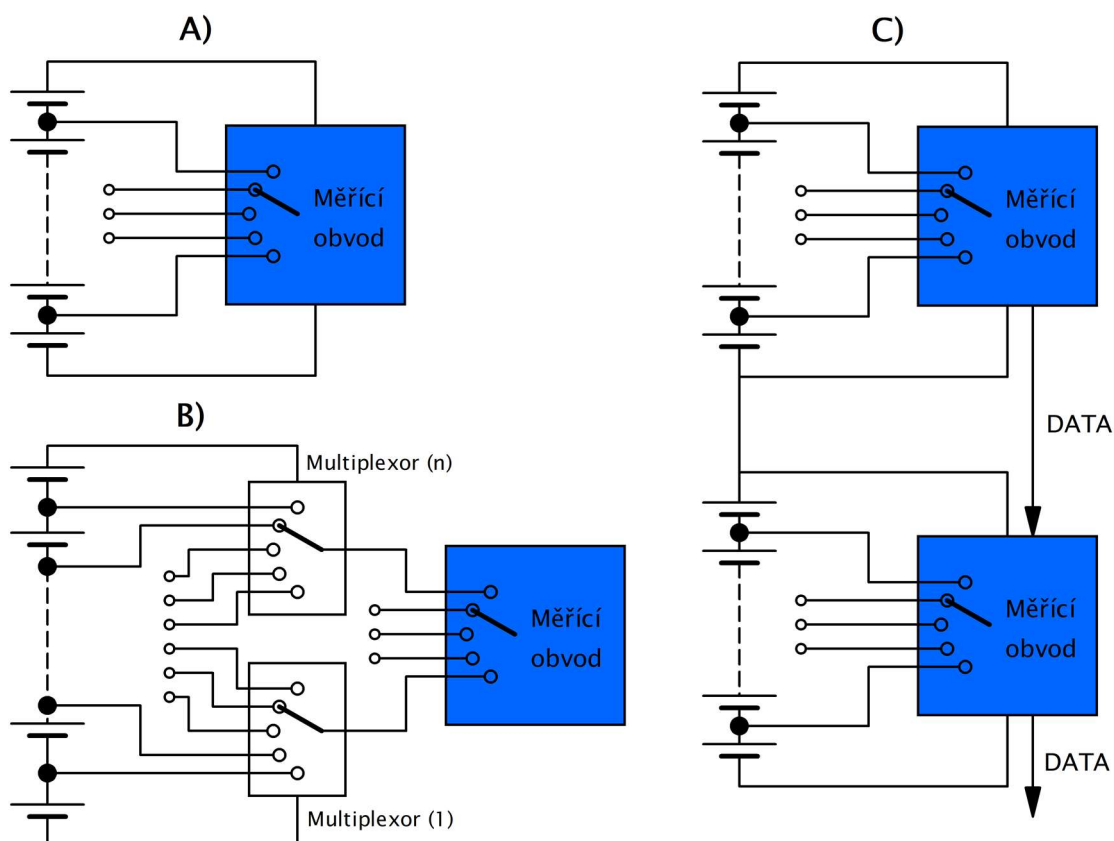


Obrázek 8: Příklad obvodu s IO pro aktivní balancování [3]

3.5 Možnosti měření elektrického napětí a teplot

Ze základního požadavku na zařízení BMS měřit hodnoty napětí U_C všech článků a také teplot T_C vyplývá nutnost velkého počtu analogových vstupů, tj. několika desítek. Měřicí člen musí tedy tuto podmínku splňovat. Nabízí se nám tak tři základní koncepty řešení.

První z nich je použití pouze jednoho měřicího členu s velkým počtem analogových vstupů a integrovaným multiplexorem (elektronickým přepínačem), tj. možnost A. Druhou možností B je použití opět jednoho měřicího členu, ale několika multiplexorů připojených na analogové vstupy měřicího obvodu. Tím by došlo ke snížení požadavku na počet vstupů měřicího členu. Poslední uvažovanou možností C je využití více měřicích členů, které by naměřená data přeposílaly do řídicího členu.

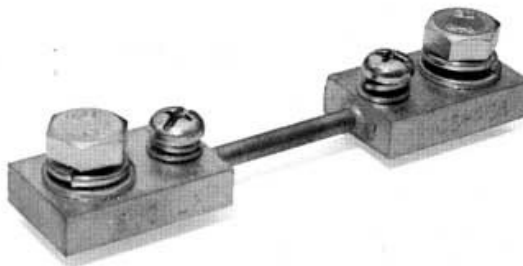


Obrázek 9: Principiální schéma možností měření napětí a teplot, možnosti A), B), C)

3.6 Možnosti měření elektrického proudu

Hodnota naměřeného elektrického proudu je v zařízení BMS využita pro jednu z jejích základních funkcí, a tou je „softwarová proudová ochrana“. Díky tomu, že zařízení BMS bude mít informaci o aktuálním proudovém zatížení bateriového úložiště, bude schopno na tuto situaci reagovat dvěma způsoby, a to buď odesláním zprávy kontroléru s požadavkem omezení výkonu, nebo odpojením bateriového úložiště od zátěže. Dále budou popsány dva základní způsoby měření stejnosměrného elektrického proudu.

Prvním způsobem měření elektrického proudu I je použití tzv. bočnicku. Jedná se o rezistor s nízkou hodnotou elektrického odporu R , který je zapojen sériově se zátěží, která měřený proud odebírá. Měřenou veličinou je elektrické napětí U vzniklé jako úbytek na bočniku. Ze znalosti tohoto napětí a hodnoty odporu lze podle Ohmova zákona spočítat hodnotu elektrického proudu bočnicku I . Nevýhodou tohoto způsobu měření je nepřesnost způsobená změnou hodnoty elektrického odporu vlivem teploty a také ztrátový výkon P_Z .



Obrázek 10: Příklad provedení bočnicku [14]

Druhou možností je použití senzoru elektrického proudu založeného na Hallově jevu. Ten vzniká v polovodiči, který je vystaven vnějšímu magnetickému poli. Princip měření stejnosměrného proudu je pak následující: okolo vodiče, který je protékán stejnosměrným elektrickým proudem I , vzniká magnetické pole. Toto magnetické pole indukuje v Fe jádře proudového senzoru magnetický tok o magnetické indukci B . Vlivem tohoto toku vzniká na tenké polovodičové destičce senzoru Hallovo napětí, které bývá pro následné měření zesíleno pomocí zesilovače. Naměřená hodnota

elektrického napětí U je přímo úměrná hodnotě procházejícího elektrického proudu vodičem dle vztahu (k představuje konstantu postihující tloušťku a materiál polovodičové destičky):

$$U = k * I * B$$



Obrázek 11: Příklad proudového senzoru založeného na Hallově jevu [15]

4 Návrh a realizace BMS

V této kapitole finálně definuji navrhované zařízení BMS, a to na základě požadavků a rozboru možných řešení z předchozích částí textu. Před samotným návrhem zařízení BMS uvádím stručný návrh bateriového úložiště. Tento krok je nezbytný pro přesné stanovení počtu měřících napěťových vstupů a hodnoty balančního odporu R_{BAL} .

4.1 Koncept bateriového úložiště

Na základě předchozího rozboru technologií a typů bateriových článků jsem pro koncept bateriového úložiště vybral Li-ion články v provedení 18650. Toto mé rozhodnutí je opodstatněno jejich lepšími parametry oproti ostatním typům:

- vyšší hustotou energie,
- nízkou úrovní samovybíjení,
- vyšším počtem cyklů nabití/vybití,
- jsou bezúdržbové.

Kromě těchto parametrů je výhodou konstrukční provedení článků, přesněji jejich rozměry. Pro dosažení požadovaných jmenovitých hodnot se dají tyto články snadno spojovat do sériově paralelního zapojení. Možnost variabilnosti prostorové konfigurace bateriového úložiště je v aplikaci pro elektrický motocykl zásadní. Dalším důvodem pro jejich výběr je skutečnost, že tyto články jsou ve velké míře používány v elektromobilech, elektrických skútrech a kolech.

4.2 Porovnání dostupných Li-ion 18650 článků

V následující tabulce jsou uvedeny základní parametry běžně dostupných Li-ion 18650 článků. Tabulka neobsahuje názvy a výrobce, neboť cílem bylo porovnat kombinace jednotlivých parametrů článků a vybrat články s nejvhodnější kombinací. Tabulka pro další porovnání obsahuje i články Winston a Sinopoly, které oproti ostatním typům disponují vysokými hodnotami kapacity C a vybíjecího proudu I . Hodnota U_{MAX} je maximální nabíjecí napětí článku a je zde uvedena, neboť na ní závisí počet článku BU při daném dovoleném napětí U_{BU} .

Tabulka 3: Průzkum parametrů vybraných typů článků

č.	označení	typ	C (Ah)	U _{MAX} (V)	I (A)	s (ks)	p (ks)	k (ks)	n (ks)	I/In (-)	C _{BU} (Wh)	m (kg)	cena (Kč)	V (dm ³)
1	18650	Li-Ion	2,0	4,2	22	30	14	26	1200	0,34	10,08	54,0	300 000	19,8
2	18650	Li-Ion	2,1	4,2	30	30	10	28	1140	0,26	10,05	51,3	285 000	18,9
3	18650	Li-Ion	2,5	4,2	25	30	12	20	960	0,38	10,08	46,1	268 800	15,9
4	18650	Li-Ion	2,5	4,2	20	30	15	17	960	0,47	10,08	43,2	268 800	15,9
5	18650	Li-Ion	2,5	4,2	30	30	10	22	960	0,31	10,08	45,1	129 600	15,9
6	18650	Li-Ion	2,6	4,2	8	30	39		1170	0,99	12,78	56,2	83 070	19,4
7	18650	Li-Ion	2,9	4,2	10	30	30		900	1,00	10,96	39,6	252 900	14,9
8	18650	Li-Ion	3,0	4,2	30	30	10	17	810	0,37	10,21	38,1	105 300	13,4
9	18650	Li-Ion	3,2	4,2	10	30	30		900	1,00	12,10	44,1	112 500	14,9
10	18650	Li-Ion	3,4	4,2	7	30	47		1410	0,98	19,84	67,0	365 190	23,3
11	18650	Li-Fe-PO4	1,1	4,0	33	31	10	65	2325	0,12	10,23	97,7	532 425	38,5
12	Sinopoly	Li-Fe-PO4	40,0	4,0	120	31	3		93	0,83	14,88	139,5	161 169	92,3
13	Sinopoly	Li-Fe-PO4	200,0	4,0	600	31	1		31	0,50	24,80	179,8	275 900	107,8
14	Winston	Li-Fe-PO4	1000,0	4,0	10000	31	1		31	0,03	124,00	1271,0	1 330 582	803,4
15	18650	LTO	1,3	2,8	13	45	24	38	2790	0,37	10,16	108,8	340 380	46,1
16	18650	LTO	1,5	2,8	9	45	34	20	2430	0,62	10,21	109,4	218 700	40,2
17	66160	LTO	40,0	2,8	400	45	1	2	135	0,25	15,12	155,3	167 400	73,8

Volba konkrétního článku by se dala provést na základě porovnání vybraného parametru, například jmenovité kapacity C či ceny, případně kombinace těchto parametrů a kompromisu mezi nimi. Tento přístup by ovšem pro koncept bateriového úložiště nebyl vhodný. Lepší způsob volby článku je z pohledu celého bateriového úložiště a jeho požadovaných jmenovitých parametrů stanovených v předchozích kapitolách. Těmito parametry jsou:

- jmenovité napětí $U_{BP} = 126 \text{ V}$,
- požadovaný špičkový proud $I = 300 \text{ A}$,
- jmenovitá kapacita $C_{BU} \geq 10 \text{ kWh}$.

Pro dosažení jmenovitého napětí U_{BP} je třeba řadit celkem s článků sériově a pro dosažení požadované špičkové hodnoty proudu I_{MAX} celkem p paralelně spojených článků. Tyto hodnoty jsou společně s parametrem k uvedeny v následující tabulce. Hodnota parametru k určuje počet paralelně připojených článků navíc. Tím dochází ke zvýšení jmenovité kapacity C_{BU} a snížení proudového zatížení článků. Hodnota parametru n pak udává celkový počet článků v bateriovém úložišti.

$$n = s * (p + k),$$

$$kde \quad s = \frac{U_{bp}}{U_c}, \quad p = \frac{I_{max}}{I_c}$$

Poměr hodnot I_c/I_N vyjadřuje proudové zatížení jednoho článku při paralelním použití celkem $p+k$ článků. Jmenovitá kapacita bateriového úložiště C_{BU} je spočtena z jmenovitých hodnot článků:

$$C_{BU} = C_c * (p + k) * U_{BU}$$

Hmotnost bateriového úložiště je součinem počtu článků n a hmotnosti jednoho článku m_c :

$$m_{BU} = n * m_c$$

Cena bateriového úložiště je součinem počtu článků n a ceny jednoho článku m_c :

$$cena_{BU} = n * cena_1$$

Tabulka 4: Parametry bateriového úložiště

č.	označení	typ	U (V)	C (Ah)	I (A)	s (ks)	p (ks)	k (ks)	n (ks)	I/In (-)	C _{BU} (Wh)	m _{BU} (kg)	cena (Kč)	V (dm ³)
1	18650	Li-Ion	4,2	2,0	22	30	14	26	1200	0,34	10,08	54,0	300 000	19,8
2	18650	Li-Ion	4,2	2,1	30	30	10	28	1140	0,26	10,05	51,3	285 000	18,9
3	18650	Li-Ion	4,2	2,5	25	30	12	20	960	0,38	10,08	46,1	268 800	15,9
4	18650	Li-Ion	4,2	2,5	20	30	15	17	960	0,47	10,08	43,2	268 800	15,9
5	18650	Li-Ion	4,2	2,5	30	30	10	22	960	0,31	10,08	45,1	129 600	15,9
6	18650	Li-Ion	4,2	2,6	8	30	39		1170	0,99	12,78	56,2	83 070	19,4
7	18650	Li-Ion	4,2	2,9	10	30	30		900	1,00	10,96	39,6	252 900	14,9
8	18650	Li-Ion	4,2	3,0	30	30	10	17	810	0,37	10,21	38,1	105 300	13,4
9	18650	Li-Ion	4,2	3,2	10	30	30		900	1,00	12,10	44,1	112 500	14,9
10	18650	Li-Ion	4,2	3,4	7	30	47		1410	0,98	19,84	67,0	365 190	23,3
11	18650	Li-Fe-PO4	4,0	1,1	33	31	10	65	2325	0,12	10,23	97,7	532 425	38,5
12	Sinopoly	Li-Fe-PO4	4,0	40,0	120	31	3		93	0,83	14,88	139,5	161 169	92,3
13	Sinopoly	Li-Fe-PO4	4,0	200,0	600	31	1		31	0,50	24,80	179,8	275 900	107,8
14	Winston	Li-Fe-PO4	4,0	1 000,0	10000	31	1		31	0,03	124,00	1271,0	1 330 582	803,4
15	18650	LTO	2,8	1,3	13	45	24	38	2790	0,37	10,16	108,8	340 380	46,1
16	18650	LTO	2,8	1,5	9	45	34	20	2430	0,62	10,21	109,4	218 700	40,2
17	66160	LTO	2,8	40,0	400	45	1	2	135	0,25	15,12	155,3	167 400	73,8

Na základě hodnot parametrů hmotnosti m_{BU} článků tvořící bateriové úložiště a jejich ceny uvedených v tabulce na předchozí stránce jsem vybral články č. 3, 4, 5, 7, 8 a 9, které jsou vhodné pro bateriové úložiště, viz následující tabulka.

Tabulka 5: Vybrané parametry zvolených článků

č.	n (ks)	I/In (-)	m_{BU} (kg)	cena (Kč)	v (dm ³)
8	810	0,37	38,07	105 300	13,40
7	900	1,00	39,60	252 900	14,89
4	960	0,47	43,20	268 800	15,88
9	900	1,00	44,10	112 500	14,89
5	960	0,31	45,12	129 600	15,88
3	960	0,38	46,08	268 800	15,88
min	810	0,31	38,07	105 300	13,40

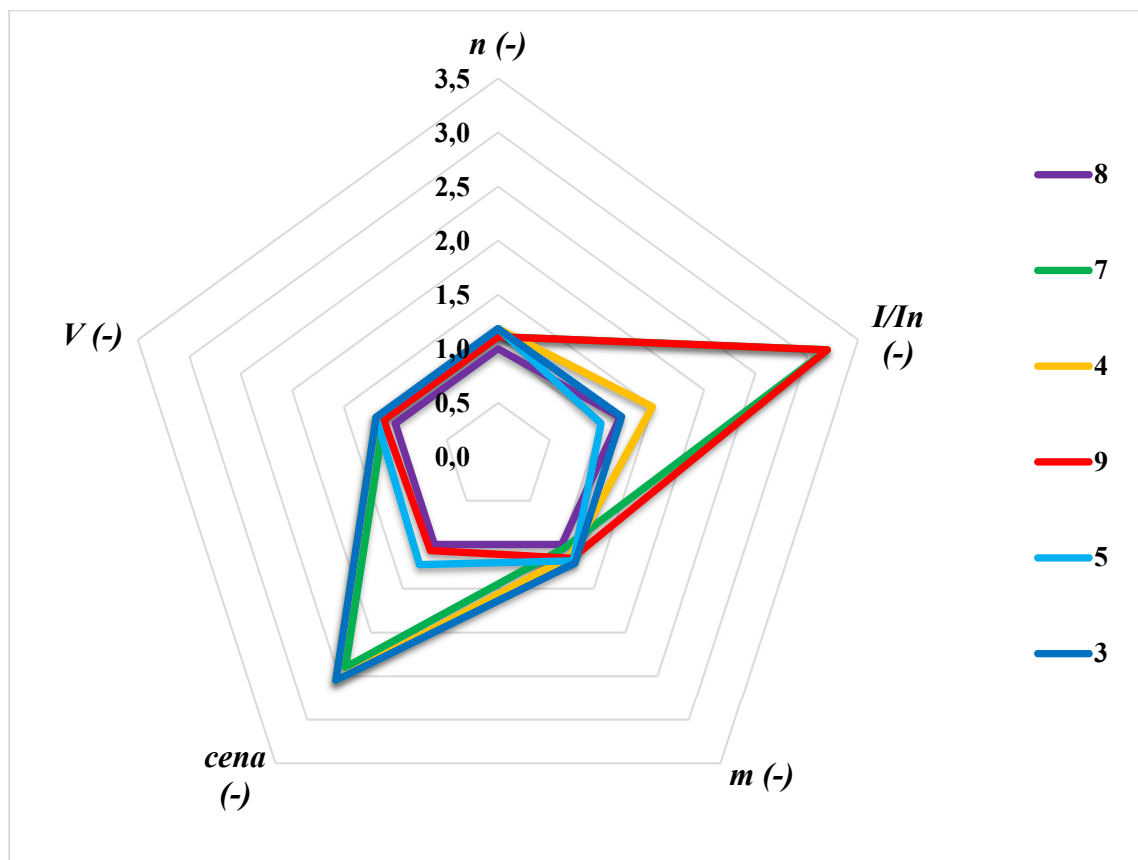
Pro lepší porovnání je vhodné hodnoty parametrů z předchozí tabulky vyjádřit v poměrné hodnotě. Tu získáme tak, že danou hodnotu parametru podělíme vždy nejlepší (minimální) hodnotou z každého sloupce.

Tabulka 6: Vybrané parametry zvolených článků v poměrných hodnotách

č.	n (-)	I/In (-)	m_{BU} (-)	cena (-)	V (-)
8	1,00	1,19	1,00	1,00	1,00
7	1,11	3,20	1,04	2,40	1,11
4	1,19	1,50	1,13	2,55	1,19
9	1,11	3,20	1,16	1,07	1,11
5	1,19	1,00	1,19	1,23	1,19
3	1,19	1,20	1,21	2,55	1,19

Poměrné hodnoty z předcházející tabulky lze graficky zobrazit pomocí „paprskového“ grafu. Čím více se hodnota poměrného parametru blíží 1, tím je článek vhodnější. To je dáno tím, že absolutní hodnoty parametrů jsou vztaženy vždy k minimální hodnotě, takže článek s nejvhodnější kombinací jednotlivých parametrů má v tomto grafu nejmenší vnitřní plochu, jejíž hranice je dána poměrnými hodnotami parametrů.

Paprskový graf poměrných hodnot článku:



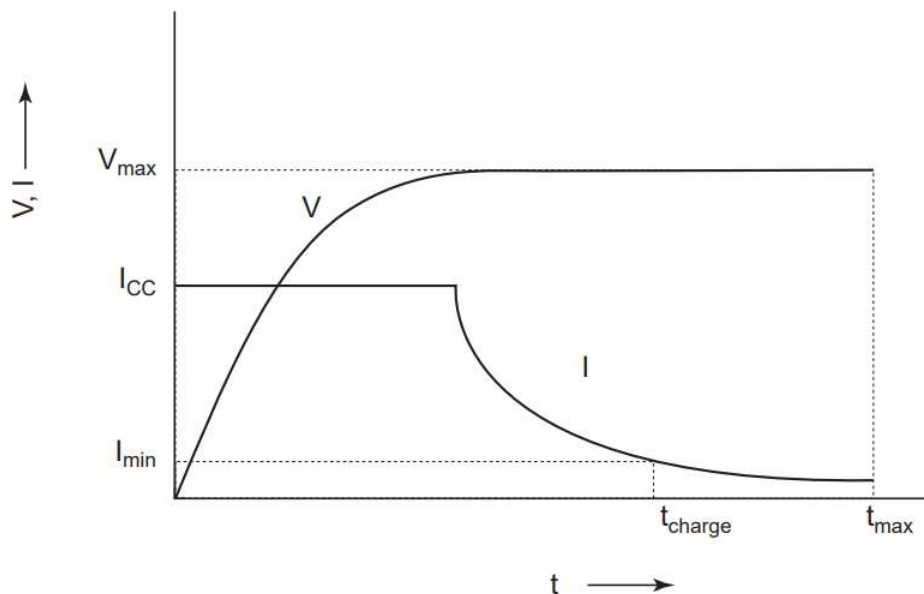
Obrázek 12: Paprskový graf zobrazující poměrné hodnoty článků

Na základě provedeného průzkumu dostupných sekundárních článků a zhodnocení jejich parametrů doporučuji pro vytvoření trakčního bateriového úložiště elektrického motocyklu bateriové články Li-ion v provedení 18650. Z tohoto důvodu je další návrh zařízení BMS přizpůsoben tomuto typu článků. Nejvhodnějšími, vzhledem k výsledkům dosažených při porovnání kombinací parametrů, jsou články označené číslem 8. Konkrétně se jedná o články Sony VTC6.

4.3 Nabíjení Li-ion článků

Pro nabíjení Li-ion článků by měl být použit cyklus, který je složen ze dvou na sebe navazujících částí. V první z nich dochází k nabíjení článku konstantním proudem I_{CC} , přičemž nabíjecí napětí U roste. Ve chvíli, kdy nabíjecí napětí dosáhne hodnoty U_{MAX} , přejde cyklus nabíjení do režimu konstantního napětí U_C při současném klesání nabíjecího proudu I . Tento způsob nabíjení článků je označován jako „CC/CV“ režim (Constant Current/Constant Voltage). [16]

Hodnoty konstantního nabíjecího proudu I_C a maximálního (konstantního) nabíjecího napětí U_{CV} jsou udávány výrobcí Li-ion článků. Hodnota nabíjecího proudu v režimu „CC“ se pohybuje v rozmezí 0,7 C do 1 C, kde C označuje jmenovitou kapacitu Li-ion článku. Podle typu Li-ion článku je hodnota nabíjecího napětí v režimu „CV“ buď 4,1 V nebo 4,2 V. [16]



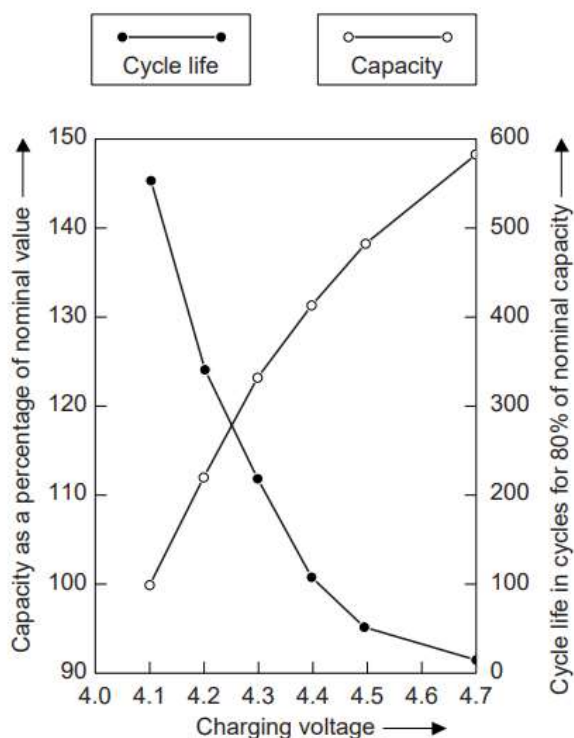
Obrázek 13: Průběh nabíjecího cyklu Li-ion článků skládajícího se z „CV“ a „CC“ části [16]

Na obrázku č. 13 je zachycen průběh nabíjecího cyklu Li-ion článků při použití CC/CV režimu. Pro ukončení nabíjecího cyklu se používá buď hodnota I_{MIN} , či hodnota t_{MAX} . Výhodou ukončení nabíjecího cyklu při dosažení hodnoty I_{MIN} je skutečnost, že článek je vždy nabit na stejnou hodnotu kapacity, která se vyjadřuje jako procentní podíl z jmenovité kapacity C_N (platí při dodržení stejné teploty a vnitřní impedance článku).

Pokud je nabíjecí cyklus ukončen po uplynutí času t_{MAX} , bývá článek vystaven po delší dobu konstantní hodnotě nabíjecího napětí, což má za následek snižování doby jeho života a počtu cyklů.

4.4 Vliv velikosti nabíjecího napětí

Nabíjení Li-ion článku napětím vyšším, než je hodnota U_{MAX} vede ke zvýšení kapacity C , ale zároveň k rychlému poklesu jeho doby života. Tato závislost je zobrazena na následujícím obrázku č. 14. Důvodem zkracování doby života článku je rozklad elektrolytu způsobený relativně vysokým napětím, které je přítomné v „CV“ části nabíjecího cyklu. Čím delší dobu je článek připojen k napětí většímu než U_{MAX} , tím více elektrolytu je rozloženo. Z této skutečnosti plyne, že životnost článku negativně ovlivňuje nejen vysoká hodnota nabíjecího napětí, ale i čas, po který je článek tomuto napětí vystaven.



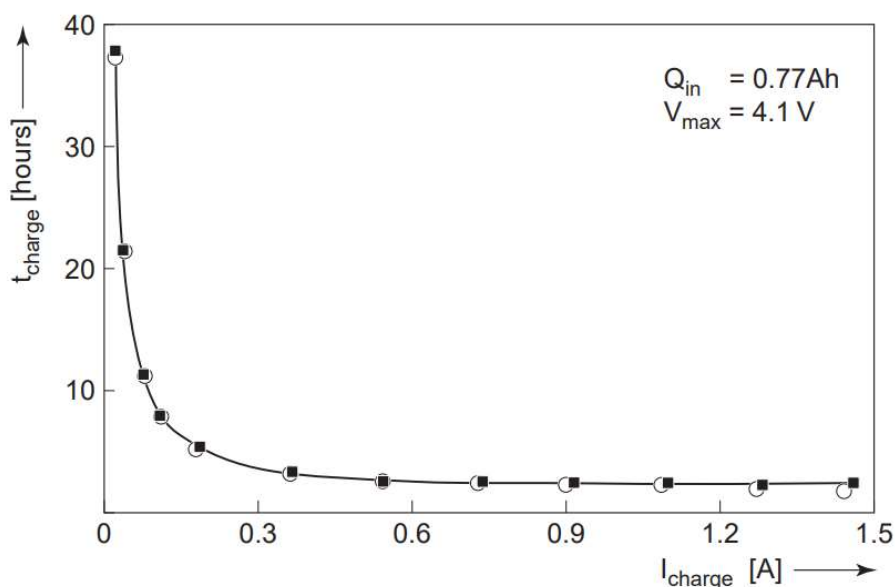
Obrázek 14: Závislost kapacity C a doby života článku na hodnotě nabíjecího napětí [16]

Hodnota maximálního nabíjecího napětí U_{MAX} se udává s přesností $\pm 1\%$. Výrobci předepisují takto vysokou hodnotu přesnosti, aby mohli zaručit udávanou jmenovitou kapacitu C_N a počet cyklů nabití/vybití článku. Například pro hodnotu $U_{MAX} = 4,1\text{ V}$ je dovolená odchylka 41 mV, což v obrázku č. 14 představuje relativně velkou změnu kapacity a počtu cyklů článku. [16]

4.5 Vliv velikosti nabíjecího proudu

Nabíjení Li-ion článku vyšším proudem by logicky mělo vést ke zkrácení celkové doby nabíjení t_{CHARGE} . Ve skutečnosti ale doba nabíjení od jisté hodnoty nabíjecího proudu klesá velmi pomalu, jak můžeme vidět na následujícím obrázku č. 15. Při nabíjení vyšší hodnotou proudu se sice zkrátí „CC“ část nabíjecího cyklu, ovšem doba nabíjení v „CV“ části nezáleží na hodnotě nabíjecího proudu. [16]

Vzrůst hodnoty nabíjecího proudu má naopak negativní vliv na životnost článku. To je způsobeno tím, že je článek vystaven hodnotě napětí U_{MAX} po relativně dlouhou dobu, což způsobuje rozklad elektrolytu, jak bylo popsáno dříve. Zvýšení jak hodnoty nabíjecího proudu, tak i hodnoty nabíjecího napětí sice vede ke snížení doby nabíjení, ale pokles životnosti článku je mnohem výraznější. [16]



Obrázek 15: Závislost doby nabíjení na hodnotě nabíjecího proudu [16]

5 Navrhované zařízení BMS

V této kapitole uvádím, na základě rozboru možných řešení, které byly popsány v předchozích částech práce, koncepční návrh zařízení BMS.

5.1 Architektura BMS

Pod pojmem architektura BMS míním způsob provedení měřících a řídicích obvodů, které byly popsány v kapitole 3.3 až 3.6. Na jejich základě jsem se rozhodl zvolit řešení, které leží mezi centralizovaným a decentralizovaným typem BMS. Měřící část se bude skládat z více měřících integrovaných obvodů, které mezi sebou budou komunikovat po datové sběrnici. Naměřená data budou dále posílána do mikroprocesoru, kde budou zpracována a vyhodnocována. Tento řídicí člen bude na základě naměřených hodnot vykonávat adekvátní akce.

5.2 Typ balančního obvodu

Pro zařízení BMS v bateriovém úložišti elektrického motocyklu jsem zvolil pasivní balanční obvod. Rozhodnutí je založeno na jeho výhodě, kterou je jednodušší topologie obvodu, čímž by mělo být zařízení teoreticky více spolehlivé. Dalším důvodem je rozměr a hmotnost systému, neboť aktivní typ balančního obvodu by se skládal z více součástí. Nevýhodou pasivního balančního obvodu je menší účinnost, neboť při balancování dochází k „maření“ energie na teplo. Tato skutečnost není v tomto případě problémem, neboť elektrický motocykl bude dobíjen připojením do elektrické rozvodné sítě.

5.3 Stanovení hodnoty balančního odporu R_{BAL}

Hodnota balančního odporu R_{BAL} bude stanovena na základě požadované hodnoty balančního proudu I_{BAL} . Napětí balancovaného článku uvažují $U_C = 4,2$ V (tj. nabíjecí napětí všech $p+k$ paralelně spojených článků v bateriovém úložišti). Ze znalosti hodnot těchto parametrů lze dle Ohmova zákona spočítat celkovou hodnotu balančního odporu:

$$R_{BAL} = \frac{U_C}{I_{bal}} \quad (\Omega)$$

Následující tabulka obsahuje takto spočítané hodnoty R_{BAL} pro rozsah balančního proudu I_{BAL} od 0,25 A do 0,65 A. Fyzicky se balanční rezistor bude skládat ze čtyř samostatných SMD rezistorů v provedení 2512. Hodnota odporu jednoho rezistoru je označena jako 4R. Tabulka také obsahuje hodnotu skutečného výkonu jednoho použitého rezistoru P_{S4R} , která je dána:

$$P_{S4R} = U_C * \frac{I_{BAL}}{4} \quad (W)$$

Dále je zde uvedena hodnota ideálního výkonu P_{IDEAL} , která je rovna q - násobku hodnoty P_{S4R} a představuje jmenovitý výkon jednoho rezistoru P_N . Hodnota q je zavedena jako bezpečnostní koeficient snižující tepelné zatížení rezistoru a jeho okolí na desce plošného spoje (dále jen DPS).

Tabulka 7: Výpočet hodnoty balančního odporu R_{BAL} (Ω)

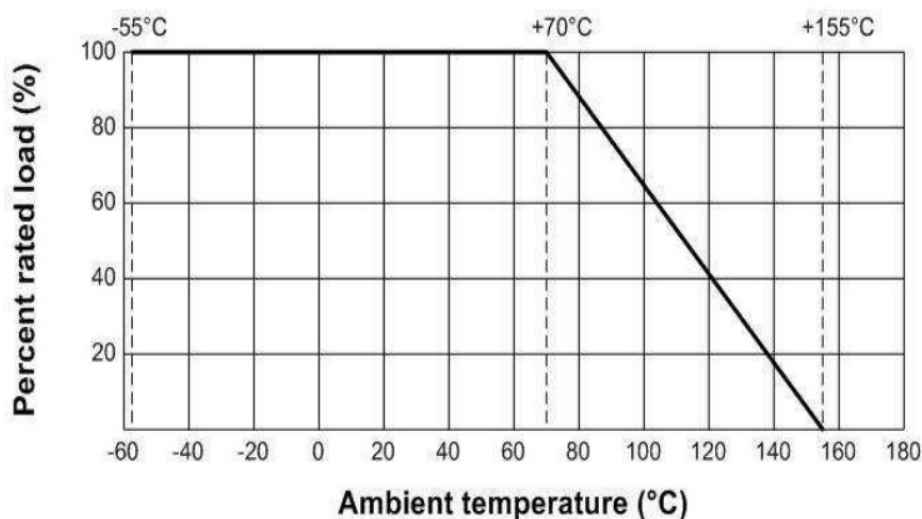
I_{BAL} [A]	R_{BAL} [Ω]	4R [Ω]	P_{S4R} [W]	P_{IDEAL} [W]
0,65	6,46	25,85	0,68	3,41
0,60	7,00	28,00	0,63	3,15
0,55	7,64	30,55	0,58	2,89
0,50	8,40	33,60	0,53	2,63
0,45	9,33	37,33	0,47	2,36
0,40	10,50	42,00	0,42	2,10
0,35	12,00	48,00	0,37	1,84
0,30	14,00	56,00	0,32	1,58
0,25	16,80	67,20	0,26	1,31

Vybraný typ rezistoru má běžně jmenovité hodnoty výkonu $P_N = 2 \text{ W}$. Z této skutečnosti vyplývá možnost použití rezistoru s hodnotou elektrického odporu od 48 do 67,2 Ω viz předchozí tabulka. Pro balanční obvod navrhovaného zařízení BMS volím střed tohoto intervalu, tj. hodnotu odporu jednoho rezistoru **56 Ω** . Výsledná hodnota balančního odporu bude při paralelním zapojení čtyř těchto rezistorů **14 Ω** .

Tuto hodnotu jsem zvolil na základě následujících kritérií:

- jmenovitého výkonu rezistoru P_N ,
- teplotního omezení DPS a rezistoru,
- závislosti výkonu rezistoru P_N na teplotě,
- rozměru balančního obvodu.

Příklad závislosti výkonu rezistoru na teplotě okolí (vzduchu, chladiče) je znázorněn na následujícím obrázku. Teplota rezistoru může dosahovat hodnoty až 150 $^{\circ}\text{C}$, ovšem v takovém případě musí dojít k redukci zatížení rezistoru, tj. omezení jeho výkonu. I z toho důvodu byl při výpočtu jmenovitého výkonu rezistoru použit koeficient $q = 5$ (-).



Obrázek 16: Teplotní omezení použitého rezistoru [17]

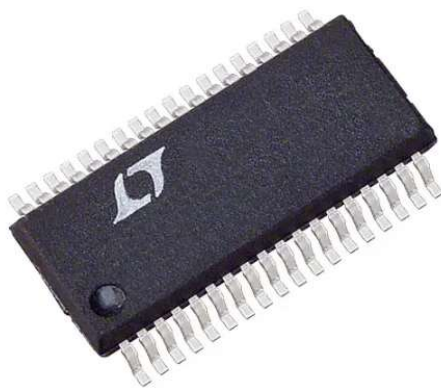
5.4 Měření analogových veličin

5.4.1 Měření elektrického napětí a teploty

Pro měření elektrického napětí U_C a teplot T jednotlivých článků v několika bodech bateriového úložiště bude použit integrovaný měřicí obvod (dále jen IMO). Vzhledem k velkému počtu napěťových vstupů $s = 30$ bude použito více IMO. Z průzkumu dostupných IMO, které by byly vhodné pro zařízení BMS v aplikaci na elektrický motocykl, jsem vybral měřicí člen „MultiCell Battery Stack Monitor“ LTC6802-1 od firmy Linear Technology.

Tento měřicí integrovaný obvod poskytuje kompletní monitorovací funkce bateriového úložiště. Jeho součástí je 12-bitový analogově digitální převodník, přesná napěťová reference a sériové komunikační rozhraní SPI. IMO LTC6802-1 nabízí možnost měření až 12 bateriových článků o celkovém napětí do 60 V. Minimální napájecí napětí je stanoveno na 10 V, což odpovídá použití minimálně třech Li-ion článků. Dále obsahuje 2 vstupy pro měření teploty. [18]

Jednotlivé LTC6802-1 IMO se dají řadit sériově pro měření více jak 12 článků. Naměřené hodnoty se následně přeposílají po datové sběrnici. IMO dále obsahují integrované MOSFET tranzistory, pro spínání pasivních balančních obvodů. Pro omezení spotřeby IMO nabízí „standby“ mód. [18]



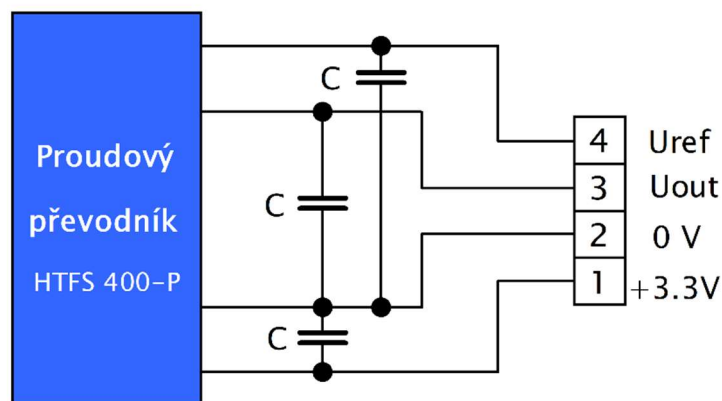
Obrázek 17: Integrovaný měřicí člen LTC6802-1 [19]

5.4.2 Měření elektrického proudu

Pro měření hodnoty elektrického proudu odebíraného/dodávaného z/do bateriového úložiště bude použita Hallova sonda. Dle stanovené hodnoty maximálního odebíraného proudu I_{MAX} 300 až 400 A jsem vybral proudovou sondu označovanou jako „current transducer“ HTFS 400-P výrobce LEM. Jmenovitá hodnota tohoto proudového převodníku je $I_{PN} = 400$ A s měřícím rozsahem ± 600 A. Převodník má galvanicky oddělený měřený (primární) a měřící (sekundární) obvod, což je důležitá vlastnost z hlediska pravidel soutěže MotoStudent. Chyba měření převodníku je $\leq 1\%$.



Obrázek 18: Proudový převodník HTFS 400-P výrobce LEM [20]



Obrázek 19: Zapojení proudového převodníku HTFS 400-P

Výstupy U_{REF} a U_{OUT} proudového převodníku budou přivedeny na vstupy řídicího členu (procesoru) a měřeny. Hodnota proudu I_P bateriového úložiště bude vypočtena z následujícího vztahu [21]:

$$U_{out} = U_{ref} + \left(0,77 * \frac{I_P}{I_{PN}} \right) \quad (V)$$

5.5 Řídicí člen zařízení BMS

Řídicí člen zařízení BMS bude zpracovávat naměřená data a na jejich základě provádět logické řízení. Dalším jeho úkolem bude zprostředkování komunikace. Tu můžeme rozdělit na dvě skupiny podle vzdálenosti, na kterou budou data přeposílána.

První z nich je komunikace v rámci plošného spoje. Do této skupiny spadá předávání naměřených hodnot elektrického napětí jednotlivých článků U_C a teplot T vybraných bodů bateriového úložiště. Tato komunikace bude probíhat mezi jednotlivými IMO LTC 6802-1 pomocí Serial Peripheral Interface (SPI).

Druhou skupinou je komunikace na delší vzdálenosti, tj. v případě elektrického motocyklu maximální délka do 2 metrů. V tomto případě budou data předávána mezi jednotlivými moduly, kterými jsou například kontrolér elektrického motoru, displej či záznamové zařízení. Pro tuto komunikaci bude využita CAN sběrnice.

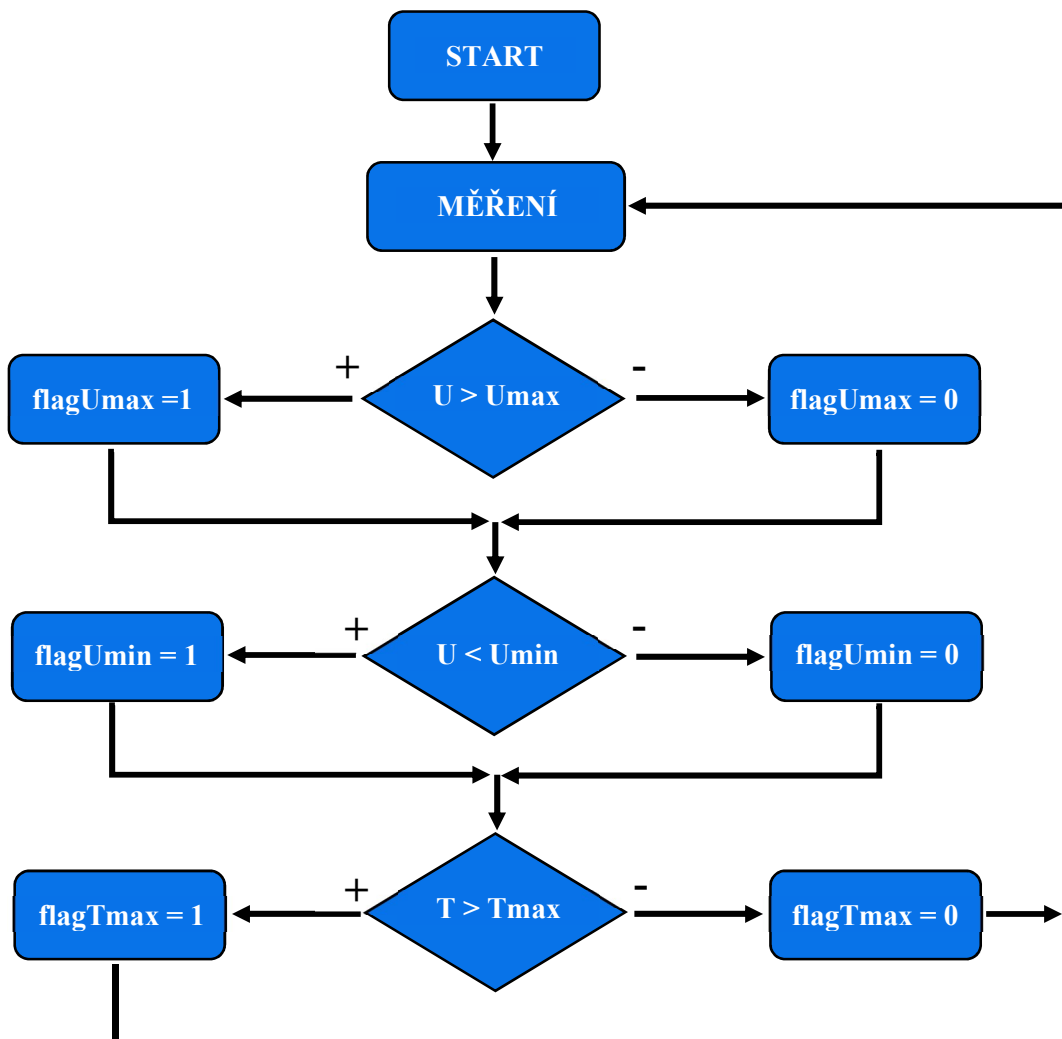
Pro výběr mikroprocesoru do zařízení BMS je důležité stanovit následující parametry:

- možnost SPI komunikace,
- podporu CAN rozhraní,
- počet analogových vstupů/výstupů,
- velikost paměti pro program,
- dostatečnou velikost paměti pro případné ukládání dat,
- rychlost mikroprocesoru.

Nabídka mikroprocesorů je velice široká, proto jsem nejdříve zvolil výrobce STMicroelectronics a následně použil jeho nástroj ST MCUFinder určený pro výběr mikroprocesoru na základě požadovaných vlastností. Z nabízených možností jsem vybral STM32F405RGT6 s následujícími parametry:

- možnost SPI komunikace: **ANO**,
- podpora CAN rozhraní: **ANO**,
- počet analogových vstupů/výstupů: **140**,
- velikost paměti pro program: **1 Mbyte**,
- rychlost mikroprocesoru: **168 MHz**.

5.5.1.1 Vývojový diagram vyhodnocování



Obrázek 20: Vývojový diagram vyhodnocování

Význam použitých příznaků a jejich vliv na řízení BMS je následující:

- pokud $flagU_{MAX} = 1$, pak sepne příslušný balanční obvod,
- pokud $flagU_{MAX} = 0$, pak vypne příslušný balanční obvod,
- pokud $flagU_{MIN} = 1$, pak dojde k odepnutí zátěže,
- pokud $flagU_{MIN} = 0$, pak dojde k opětovnému připojení zátěže,
- pokud $flagT_{MAX} = 1$, pak dojde k odepnutí zátěže,
- pokud $flagT_{MAX} = 0$, pak dojde k opětovnému připojení zátěže.

Při vyhodnocování výrazu $U < U_{MIN}$ ve vývojovém diagramu na obrázku č. 18 není pro přehlednost zachycena hystereze. K připojení zátěže musí dojít při hodnotě napětí $U_{MINI} > U_{MIN}$. To je dáno faktem, že při odpojení zátěže vzroste napětí a došlo by tedy k jejímu opětovnému připojení, což by mělo za následek opětovný pokles napětí a následné odpojení. Systém by se tedy rozkmital mezi těmito dvěma stavy.

5.6 Popis komunikace

5.6.1 Controller Area Network (CAN)

CAN je sériová datová sběrnice, která byla původně vyvinuta pro automobilovou techniku společností Bosh. Slouží především pro komunikaci jednotlivých řídicích jednotek a senzorů ve vozidle.

Zařízení komunikující pomocí sběrnice CAN vysílají zprávy v balíčcích zvaných rámce. Rámec se skládá z 8 klíčových částí, jejichž struktura je uvedena na následujícím obrázku:



Obrázek 21: Popis struktury rámce zprávy CAN [22]

Zařízení komunikující na CANu nemají přidělené adresy, všechny mají stejný přístup ke sběrnici, mohou tedy přijímat a odesílat zprávy. Tyto zprávy mají přidělené priority a na sběrnici je vysílána zpráva s nejvyšší prioritou (nejnižší hodnotou).

Význam zkratk v předešlém obrázku je následující:

- SOF bit = Start Of Frame, dominantní (logická 0) bit indikuje pro ostatní zařízení začátek zprávy,
- CAN-ID = slouží pro identifikaci zprávy a udává její prioritu, může být 11- bitový (standart) nebo 29 – bitový (extended),
- RTR bit = Remote Transmission Request – určuje, zda je zpráva vysílána na požadavek,
- Control bit = Data Length Code – udává počet bajtů posílaných dat,
- Data – obsahuje samotná data (pro použití musí být přepočítána), 0 až 8 bajtů,
- CRC = Cyclic Redundancy Check – 15 bitů, slouží k odhalení chyby v datech,
- ACK = Acknowledgement – udává, zda byla zpráva řádně přijata,
- EOF = End Of Frame – udává konec rámce.

Způsob, jakým mají být data komunikována, udávají protokoly. Mezi nejvíce používané standartní protokoly patří:

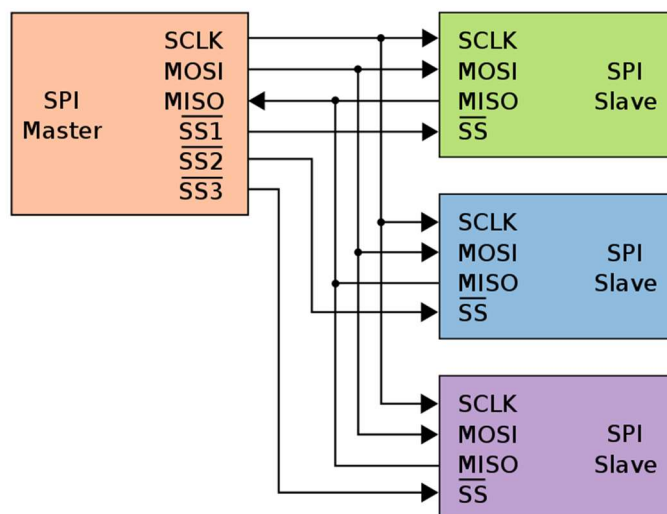
- SAE J1939,
- OBD-II (On-board Diagnostic),
- CAN-open.

Komunikace pomocí CAN sběrnice je ve vozidlech široce používána především kvůli svým výhodám, kterými jsou:

- nízká cena – redukuje ostatní komunikační cesty, snižuje hmotnost, zvyšuje spolehlivost,
- odolnost proti elektromagnetickému rušení – vhodné pro vozidla,
- efektivita – při kolizi nedochází k přerušení komunikace, zprávy s vyšší prioritou mají přednost,
- flexibilita – možnost připojit zařízení bez úpravy systému.

5.6.2 Serial Peripheral Interface (SPI)

SPI je stejně jako CAN sériová datová sběrnice, ovšem sloužící pro přenos informace na malé vzdálenosti mezi integrovanými obvody v rámci plošného spoje. Jedno ze zařízení komunikujících na této sběrnici je vždy tzv. master a ostatní zařízení jsou označována jako slave. Zařízení typu master je zdrojem hodinového signálu a ostatní zařízení typu slave tento signál přijímají, jde tedy o synchronní komunikaci. Zařízení typu master dále určuje, které zařízení typu slave bude data na sběrnici vysílat.



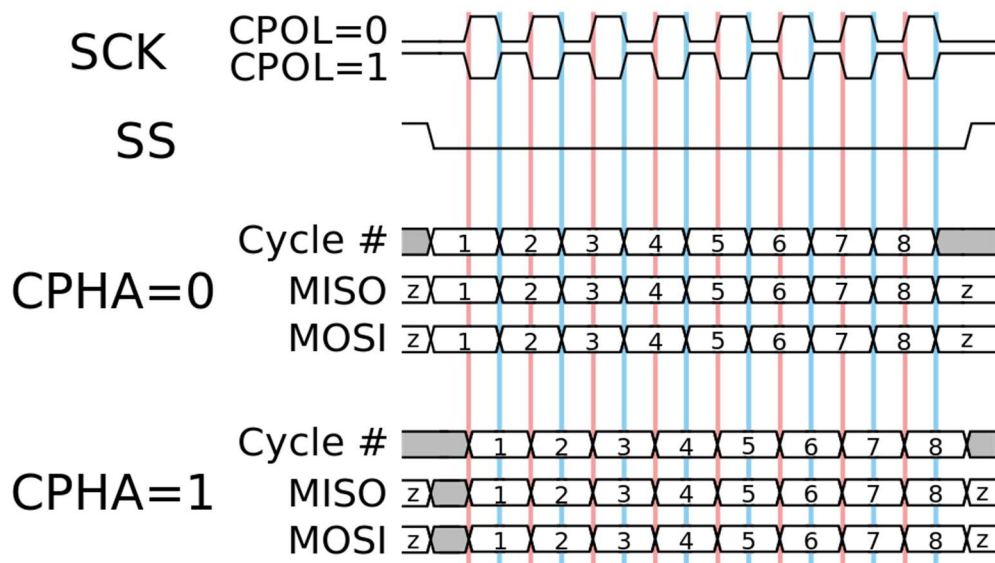
Obrázek 22: Princip komunikace pomocí SPI [23]

Průběh komunikace je následující:

- zařízení typu master nastaví hodnotu logické 0 na pinu SS (Slave Select) vybraného zařízení typu slave,
- obě zařízení vyšlou data na hranu hodinového signálu vysílaného na pinu SCLK,
- vždy je postupně vysíláno 8 bitů dat, tj. 1 bajt,
- zařízení typu master vysílá na pinu MOSI (Master Out Slave In) a zařízení typu slave vyšle data pomocí pinu MISO (Master In Slave Out),
- pro ukončení komunikace nastaví zařízení typu master hodnotu logické 1 na pinu SS.

Pro správnou funkci komunikačního rozhraní SPI je důležité provést konfiguraci komunikujících zařízení. To spočívá v nastavení vztahu mezi hodnotou hodinového signálu SCLK a daty. Je třeba nastavit klidovou (tj. v době, kdy nejsou vysílána data) hodnotu signálu SCLK a okamžik čtení dat pomocí následujících konfiguračních bitů:

- CPOL = 0, klidová úroveň signálu SCLK = 0,
- CPOL = 1, klidová úroveň signálu SCLK = 1,
- CPHA = 0, data jsou vzorkována při přechodu signálu SCLK z klidové do aktivní úrovně,
- CPHA = 1, data jsou vzorkována při přechodu signálu SCLK z aktivní do klidové úrovně.



Obrázek 23: Časový průběh komunikace v závislosti na konfiguraci [23]

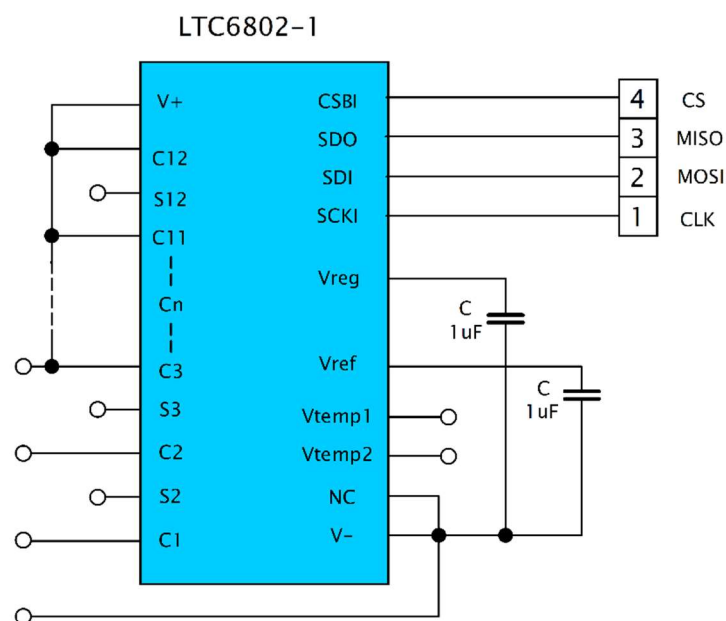
6 Návrh zapojení a DPS prototypu zařízení BMS

V této kapitole uvádím návrh zapojení a desky plošného spoje prototypu zařízení BMS. V závěru pak popisuji zhodnocení funkcí s výčtem zjištěných vlastností a nedostatků tohoto zařízení.

6.1 Návrh prototypu BMS

Před návrhem samotného zařízení BMS pro měření napětí 30 bateriových článků ještě ověřím funkci IMO LTC6802 na prototypu, který bude určen pouze pro měření napětí 3 článků. Základní vlastnosti a konfigurace prototypu jsou následující:

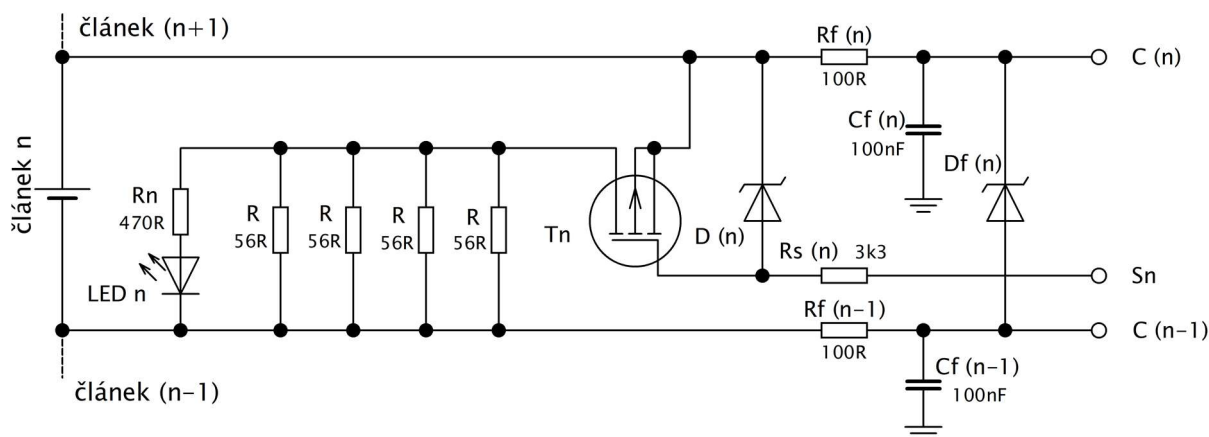
- na DPS není umístěn řídicí obvod – procesor,
- zpracování dat bude provedeno pomocí vývojové destičky s procesorem STM32F405RGT6,
- prototyp obsahuje 3 balanční obvody s dříve stanovenými parametry,
- některé piny LTC6802 jsou vyvedeny pro další konfiguraci.



Obrázek 24: Zapojení hlavních pinů LTC6802-1

Na následujícím obrázku č. 24 je uvedeno základní zapojení LTC6802. Piny označené jako $C1$ až Cn jsou vstupy pro měření elektrického napětí článků U_C , piny V_{TEMP1} a V_{TEMP2} slouží k připojení NTC 100k termistorů pro měření teploty T . Piny $S1$ až $S12$ jsou výstupy pro spínání balančních obvodů jednotlivých článků. $V+$ pin společně s $V-$ slouží k napájení měřicího obvodu. Komunikace přes SPI probíhá na $CSBI$, SDO , SDI a $SCKI$ pinech. Výstup referenčního napětí 3,075 V je na pinu V_{REF} . Pin V_{REG} je výstupem lineárního napěťového regulátoru. Na oba výstupu jsou připojeny externí kondenzátory.

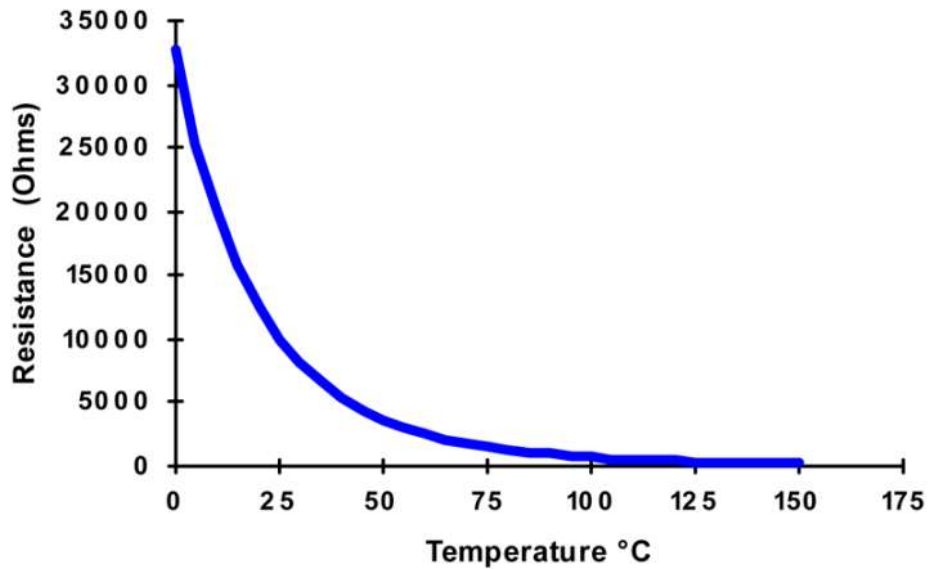
Při použití méně jak 12 článků musí být nevyužité napěťové měřicí vstupy spojeny s kladným pólem posledního měřeného článku. V případě měření 3 článků je to pin $C3$.



Obrázek 25: Balanční a filtrační obvod n -tého článku

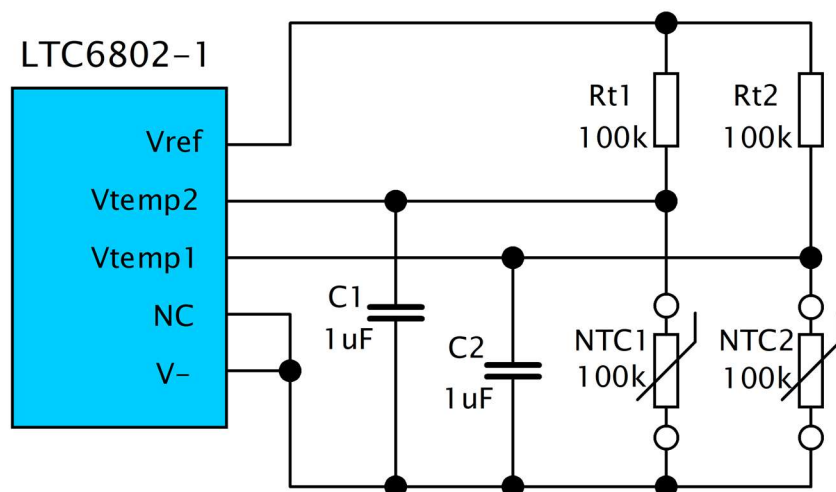
Zapojení balančního a filtračního obvodu je zobrazeno na předchozím obrázku. Balanční obvod se skládá z balančního rezistoru o hodnotě elektrického odporu $R_{BAL} = 16 \Omega$, MOSFET tranzistoru pro jeho spínání a LED paralelně připojené k balančnímu odporu pro vizuální určení sepnutí balančního obvodu. Filtrační RC obvod je tvořen rezistorem R_f o hodnotě 100Ω a kondenzátorem $C_f = 100 \text{ nF}$ připojeným mezi měřicí vstup a pin $V-$ IMO LTC6802.

Měření teploty bude realizováno pomocí teplotních čidel (NTC termistorů). Jejich výhodou je minimální náročnost zapojení. Nevýhodou pak nutnost termistory kalibrovat. Teplotní závislost odporu termistoru je pro řadu bodů udávána výrobcem.



Obrázek 26: Příklad teplotní závislosti termistoru [24]

Následující obrázek zachycuje použité schéma zapojení pro měření teploty pomocí termistorů NTC a měřicího členu LTC6802.



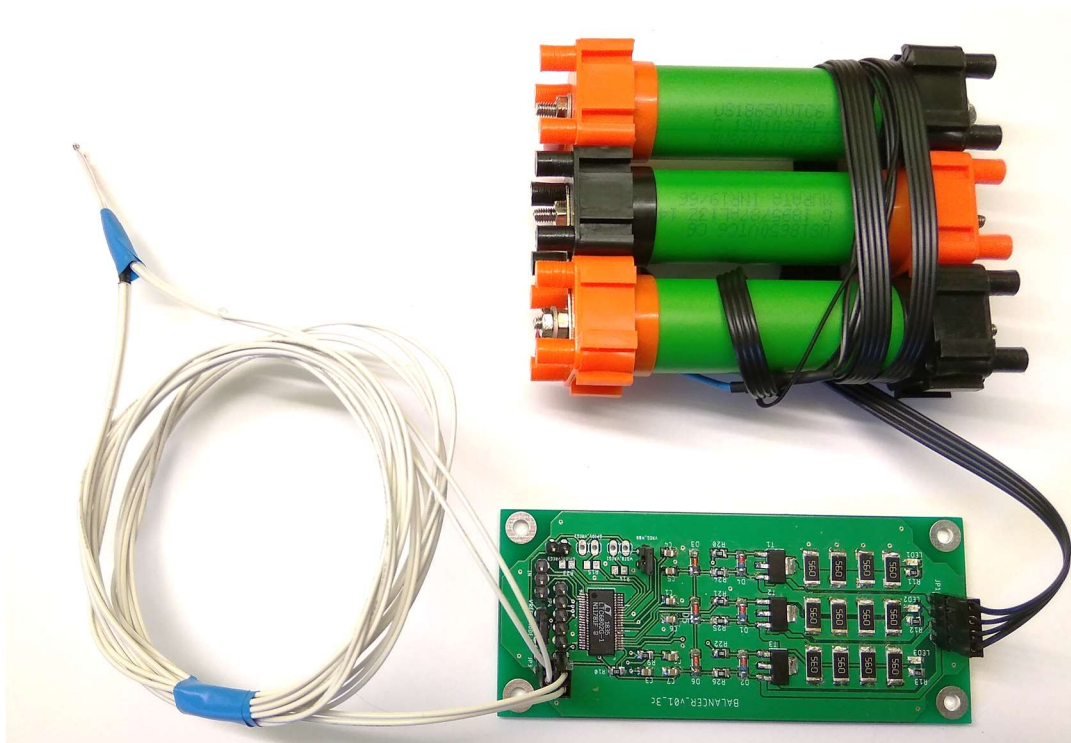
Obrázek 27: Zapojení termistorů pro měření teploty bateriového úložiště

6.2 Testování prototypu zařízení BMS

Obsahem této podkapitoly je test pro ověření funkčnosti navrženého prototypu zařízení BMS pro měření napětí U_C třech článků a dvou hodnot teplot T . Prototyp zařízení byl připojen k vývojové destičce s procesorem STM32F405RGT6.

Sestava pro test se skládá z následujících komponent:

- prototyp zařízení BMS,
- 3 sériově spojené Li-ion 18650 články (Sony VTC6),
- 2 termistory 100k NTC,
- vývojová destička,
- referenční voltmetr Extol a digitální teploměr DT2,
- program Terminal pro zobrazení měřených hodnot v PC.



Obrázek 28: Navržený prototyp s integrovaným měřicím obvodem a balančními obvody

Pro otestování prototypu zařízení BMS bylo prvně potřeba zapsat hodnoty do konfiguračního registru měřícího členu LTC6802. Obsahem konfigurace jsou následující parametry:

- maskování nepoužitých měřících vstupů,
- zapsání hodnoty podpětí UV a přepětí OV,
- nastavení periody komparátoru UV a OV,
- logická hodnota spínače balančního obvodu.

Postup zápisu konfigurace pomocí SPI komunikace je následující:

- na pin CSBI přivést logickou hodnotu 0,
- poslat příkaz WRCFG (0x01) – délka 1 byte,
- odeslat bajty dat obsahující konfiguraci,
- na pin CSBI přivést logickou hodnotu 1.

Postup čtení registrů obsahující naměřená data pomocí SPI komunikace je následující:

- na pin CSBI přivést logickou hodnotu 0,
- poslat příkaz RDCV (0x04) – délka 1 byte,
- příjem bajtů obsahující naměřená data,
- na pin CSBI přivést logickou hodnotu 1.

Během testu byly vyčítány hodnoty napětí U jednotlivých článků a dvě hodnoty teploty T . Výsledky testování a jejich porovnání s referenčními hodnotami U_{REF} a T_{REF} shrnuje následující tabulka.

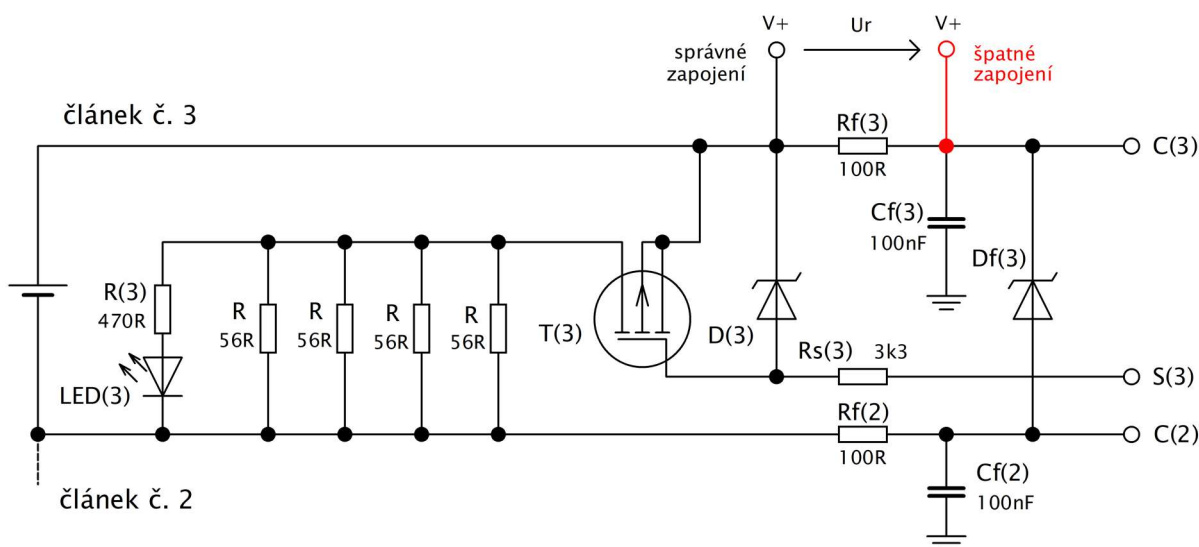
Tabulka 8: Měřená a referenční data při testu prototypu zařízení BMS

článek	U_{REF} (mV)	U_c (mV)	Balancér	Termistor	T_{REF} (°C)	T (°C)
1	4090	4086	OK	1	21,6	21
2	4080	4075	OK	2	21,6	21
3	4090	3894	OK	-	-	-

Z testu vyplývají následující skutečnosti:

- spínání balančních obvodů je funkční pro všechny 3 články (status OK),
- vyčítané hodnoty teplot T se v přijatelném rozmezí shodují s referenční hodnotou T_{REF} ,
- hodnoty napětí U článků označených čísly 1 a 2 se v přijatelném rozmezí shodují s referenčními hodnotami U_{REF} ,
- odchylky od referenčních hodnoty jsou způsobeny nejistotou použitého měřidla, které činí 10 mV,
- hodnota napětí U článku č. 3 se výrazně liší od své referenční hodnoty.

Po rozboru zapojení byla odhalena chyba způsobující rozdíl mezi skutečnou a měřenou hodnotou elektrického napětí U článku č. 3. Problém spočíval ve špatném zapojení napájecího pinu $V+$ měřícího obvodu LTC6802. Tento pin byl připojen ke kladnému pólu nejvyššího článku řetězce až za filtračním odporem $R_f(3)$. Jelikož při tomto zapojení přes odpor $R_f(3)$ protéká elektrický proud pro napájení měřícího obvodu, dochází na něm k úbytku napětí U_r a změřená hodnota napětí U je o tento úbytek menší.



Obrázek 29: Schéma zapojení balancéru článku č. 3, chybné a správné zapojení pinu $V+$

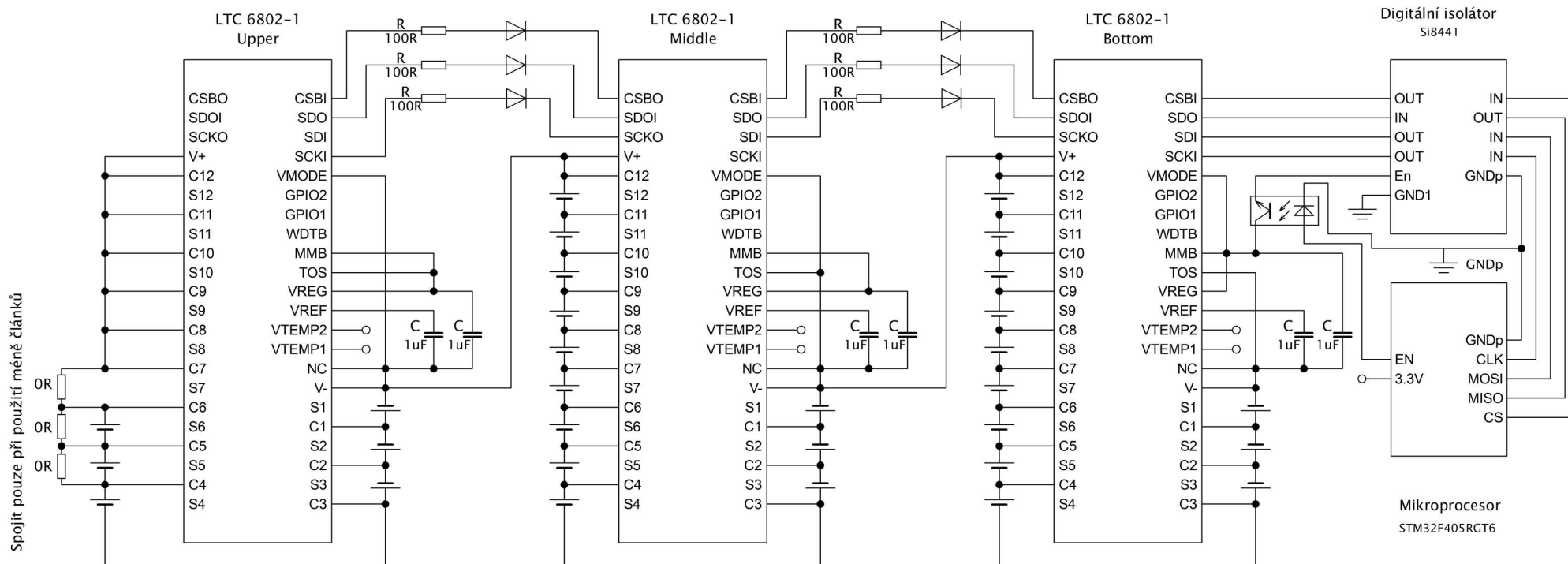
7 Návrh zapojení a DPS zařízení BMS

V následující kapitole uvádím návrh zapojení a DPS zařízení BMS pro měření 30 sériově spojených článků. Zařízení bude osazeno měřicími členy LTC6802, jejichž vhodnost pro aplikaci v zařízení BMS byla prokázána v předchozím textu.

7.1 Specifikace zařízení BMS

Základní vlastnosti a odlišnosti zařízení BMS od prototypu jsou následující:

- zařízení měří elektrické napětí U 30 sériově zapojených článků,
- na DPS je umístěno 30 pasivních balančních obvodů,
- v zařízení jsou integrovány 3 měřicí obvody LTC6802,
- počet vstupů pro teplotní čidla (termistory 100K NTC) je 6,
- DPS obsahuje vlastní procesor STM32F405RGT6 pro řízení,
- měřicí obvod je galvanicky oddělen od řídicího obvodu pomocí:
 - nejméně 7mm isolační bariéry,
 - digitálního izolátoru,
- digitální izolátor je aktivován signálem z procesoru (pro omezení spotřeby),
- zařízení podporuje komunikaci přes CAN sběrnici,
- na DPS je umístěn optočlen pro spínání signálního obvodu nabíječky,
- zařízení je vybaveno tranzistorem pro spínání nízkonapěťového obvodu motocyklu (dle pravidel soutěže MotoStudent),
- napájecí napětí je 12 V – zařízení obsahuje 5V a 3,3V napěťový regulátor,
- na DPS je umístěn konektor pro připojení proudového senzoru LEM HTFS 400-P/SP7,
- připojení vodičů od měřených článků je provedeno pomocí konektoru se zámkem (pro eliminaci výpadku měření),
- na DPS jsou vyvedeny 3 LED pro indikaci stavu, piny s napěťovou hladinou 5 V a 3,3 V a dále pak 3 obecné vstupy/výstupy procesoru.



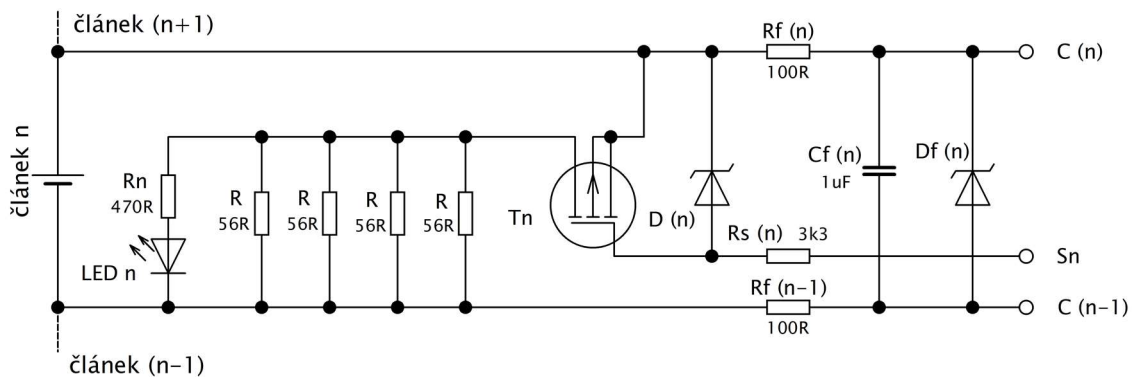
Obrázek 30: Schéma zapojení 3 měřicích obvodů LTC6802-1

7.2 Návrh zapojení zařízení BMS

Schéma zapojení měřicího obvodu zařízení BMS je uvedeno na následujícím obrázku č. 30. Při této konfiguraci (při použití celkem 3 IMO LTC6802) je možné měřit až 36 článků. Pro aplikaci zařízení BMS je požadováno pouze 30 napěťových měřících vstupů, proto je kladný pól článku č. 7 (C7) spojen s následujícími měřícími vstupy posledního měřicího obvodu LTC6802 označeného jako *UPPER*.

Ve schématu je znázorněna možnost zapojení tří rezistorů s nulovým elektrickým odporem R_0 . Tato konfigurace dovoluje zapojení počtu článků v rozmezí od 27 do 30. Dané řešení jsem zvolil pro případ, že bude nutné z konstrukčních důvodů bateriového úložiště snížit počet sériově zapojených článků.

Předávání dat mezi jednotlivými IMO LTC 6802 probíhá pomocí SPI komunikace, přičemž jednotlivé měřící obvody jsou odděleny sériovou kombinací rezistoru a diody. Výstupy pro spínání balančního obvodu nejsou ve schématu pro přehlednost vyznačeny.

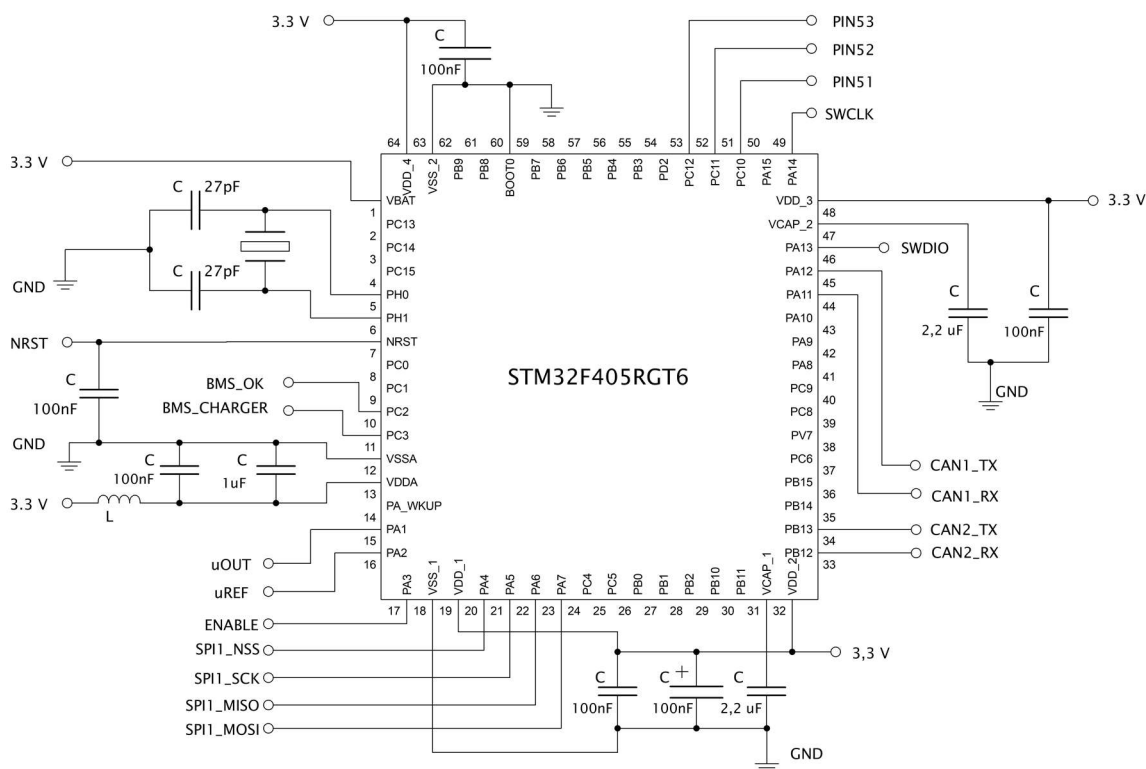


Obrázek 31: Balanční a filtrační obvod n -tého článku

Na následujícím obrázku č. 31 je znázorněno modifikované schéma zapojení balančního a filtračního obvodu. Oproti zapojení těchto obvodů v prototypu zařízení BMS je zde kondenzátor C_f umístěn mezi jednotlivé měřící vstupy napětí. Tato změna je odůvodněna faktem, že v případě zapojení kondenzátoru C_f posledního článku daného měřicího obvodu LTC6802 by napětí na tomto kondenzátoru dosahovalo hodnoty až 50,4 V ($12 \times 4,2$ V).

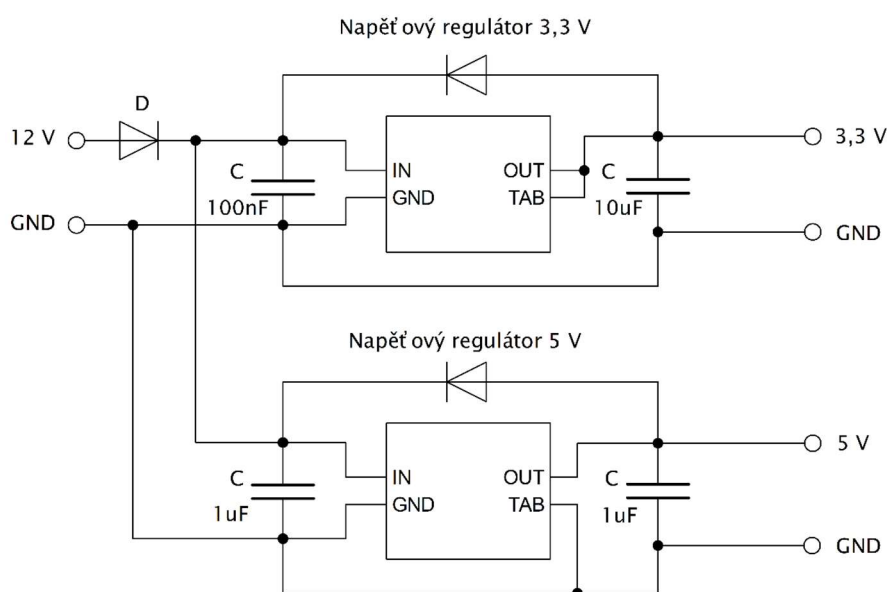
Zařízení BMS je vybaveno vlastním procesorem STM32F405RGT6 pro vyčítání naměřených dat, jejich zpracování a logické řízení. V okolí procesoru jsou dle doporučeného zapojení z datasheetu od výrobce umístěny kondenzátory. Další součástí pro chod procesoru je krystalový rezonátor určující frekvenci oscilátoru mikroprocesoru. Funkce označených pinů procesoru je následující:

- SWCLK, SWDIO, NRST – programovací rozhraní,
- 3,3 V a GND – napájení procesoru,
- BMS OK – výstupní signál určující stav bateriového úložiště,
- BMS CHARGER – signál spínající externí nabíječku bateriového úložiště,
- uOUT, uREF – vstupy pro proudové čidlo,
- ENABLE – spínání digitálního izolátoru,
- SPI1_NSS, SPI1_SCK, SPI1_MISO, SPI1_MOSI – komunikace SPI,
- CAN1(2) TX, CAN1(2)_RX – komunikace CAN.



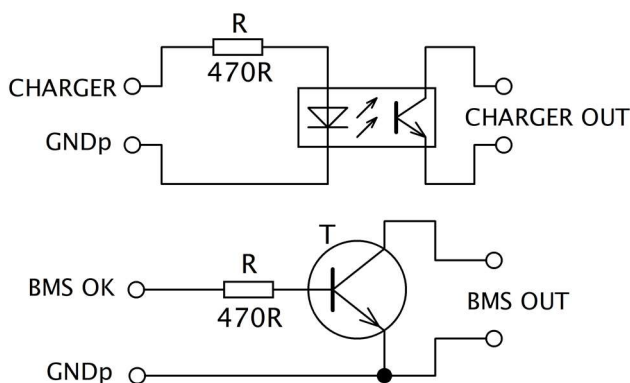
Obrázek 32: Zapojení součástek kolem procesoru STM32F405RGT6

Zařízení BMS bude napájeno z nízkonapětového palubního zdroje 12 V. Toto napětí je pomocí napětových stabilizátorů sníženo na hladinu napětí 5 V a 3,3 V. Napětový regulátor 3,3 V slouží k napájení procesoru, digitálního izolátoru a pro napájení digitálních vstupů/výstupů CAN transceiveru. 5V napětový regulátor je pak určen k napájení CAN transceiveru. Kondenzátory na výstupech napětových regulátorů jsou po odpojení napájení vybity přes diody přemostující jejich výstupy se vstupy. Dioda D je ochranná dioda proti přepólování viz následující schéma zapojení.



Obrázek 33: Zapojení 5V a 3,3V napětového regulátoru

Zařízení BMS obsahuje tranzistor, který při splnění povolených hodnot napětí článků U a teplot T sepne nízkonapětový obvod elektrického motocyklu. Dále je zde integrován optočlen pro spínání signálního obvodu externí nabíječky.

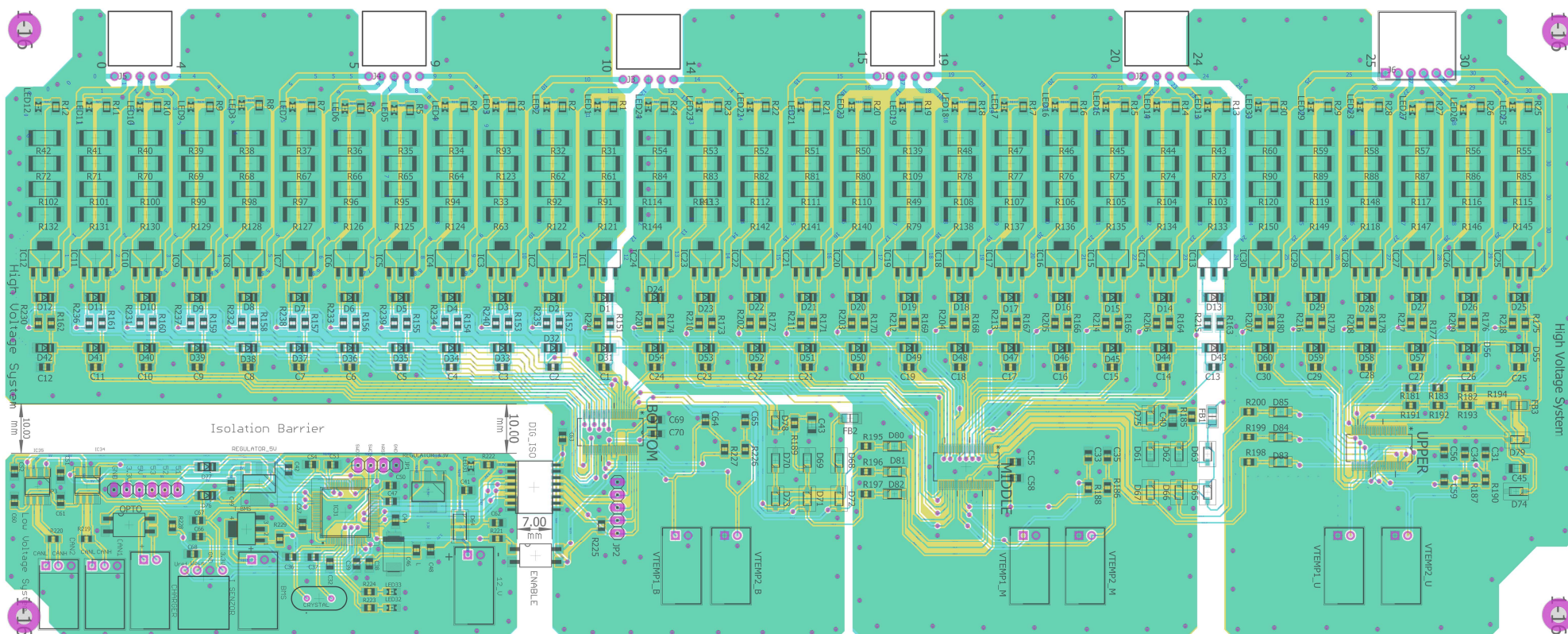


Obrázek 34: Schéma zapojení signalizace BMS OK a CHARGER

7.3 Struktura řídicího programu

Firmware (míněno řídicí program) nahraný v mikroprocesoru STM32F405RGT6 osazeného v zařízení BMS je napsán v programovacím jazyce C. Samotné nahrávání firmwaru je uskutečněno pomocí SWD sběrnice (Serial Wire Debug). Pro tvorbu a ladění kódu firmware jsem použil vývojové prostředí *Keil uVision4*. Na následujícím obrázku uvádím strukturu kódu.

```
.....  
#include "stm32f4xx.h"                // vtažení souborů  
.....  
static uint8_t cmd;                  // definice proměnných  
.....  
  
main()  
{  
    .....  
    Init_GPIO();                     // prototypy funkcí pro  
    Init_TIM3();                     // konfiguraci periférií  
    Init_SPI1();  
    Init_CAN();  
    .....  
  
while(1)                             // nekonečná smyčka programu  
{  
    .....  
    CAN_Transmit(CAN1, &TxMessage); // komunikace pomocí CAN  
    .....  
}  
}  
  
.....  
void Init_GPIO(void){                 // samotná konfigurace periférií  
.....  
  
void TIM3_IRQHandler (void){         // obsluha přerušení  
    .....                             // získání a zpracování dat  
    .....                             // logické řízení  
}
```



Obrázek 35: Deska plošného spoje navrženého zařízení BMS

8 Testování jednotlivých funkcí BMS

Cílem této kapitoly je ověřit funkčnost navrženého zařízení BMS. Pro otestování jsem provedl celkem tři testy, jejichž výsledky jsou uvedeny v následujícím textu.

Sestava pro testy se skládala z těchto komponent:

- navrhnuté a realizované zařízení BMS,
- 30 sériově spojených Li-ion 18650 článků (Sony VTC6),
- 6 termistorů 100k NTC,
- referenční voltmetr Extol a digitální teploměr DT2,
- CAN/USB převodník, program Terminal pro zobrazení dat v PC,
- proudové čidlo LEM HTFS 400-P,
- 3 moduly pro nabíjení Li-ion článků.

8.1 Test funkčnosti č. 1 zařízení BMS

První test je základní a má za cíl ověřit funkčnost komunikace a balančních obvodů.

Test se skládá z následujících částí:

- vyčtení 30 hodnot napětí jednotlivých článků a jejich porovnání s hodnotou naměřenou referenčním voltmetrem,
- ověření spínání jednotlivých balančních obvodů,
- vyčtení 6 hodnot teplot měřených pomocí termistorů a jejich srovnání s referenční hodnotou,
- ovládání tranzistoru označeného jako „BMS OK“,
- ovládání optočlenu označeného jako „CHARGER“.

8.1.1 Popis a zhodnocení testu č. 1

Při tomto testu jsem měřil hodnoty napětí U_C jednotlivých článků pomocí digitálního voltmetru *Extol* s rozlišením 10 mV. Nejistota měření integrovaného obvodu LTC6802-1 udávaná výrobcem je 0,25 %. Dále bylo změřeno 6 hodnot teplot T_C .

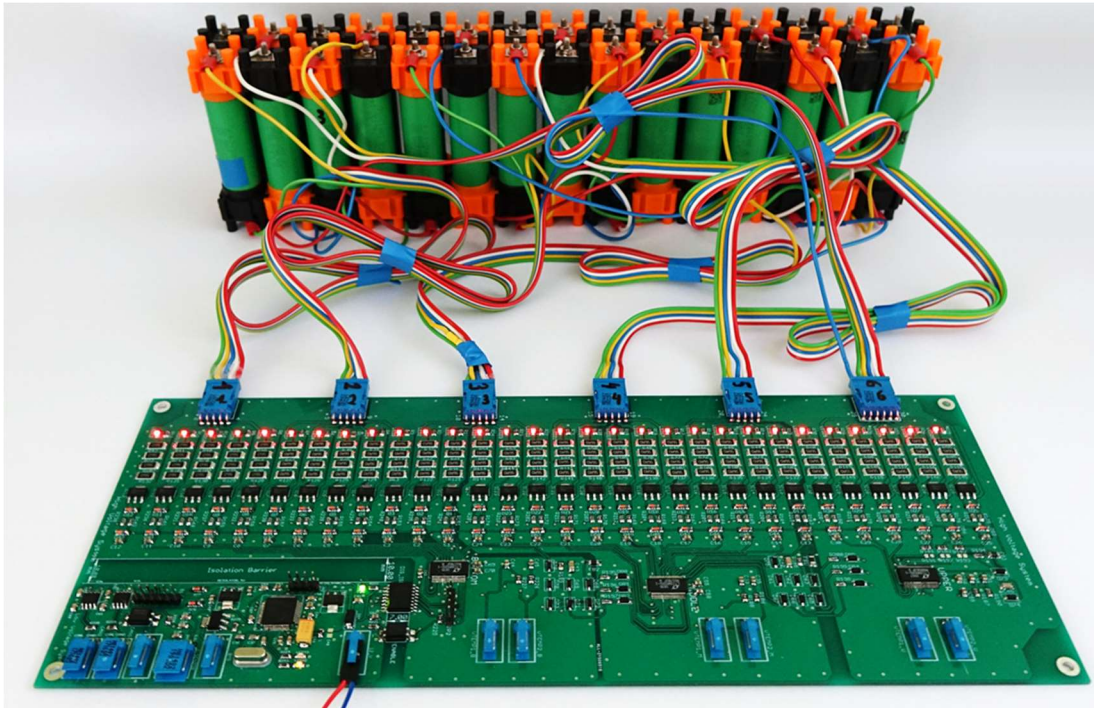
Tato data jsem následně porovnal s hodnotami měřenými zařízením BMS. Hodnoty se v rámci přesnosti použitých měřících přístrojů shodují. Dále bylo ověřeno spínání balančních obvodů. Během testu se podařilo sepnutí všech balancérů a jsou tedy označeny statusem „OK“. Naměřená data jsou zachycena v následujících tabulkách č. 9 a 10. Fotografie testovaného zařízení BMS je zachycena na následujícím obrázku. Programové spínání tranzistoru „BMS OK“ a optočlenu „CHARGER“ jsem rovněž úspěšně odzkoušel. Obě součástky jsou funkční.

Tabulka 9: Hodnoty napětí a status balančních obvodů při testu zařízení BMS

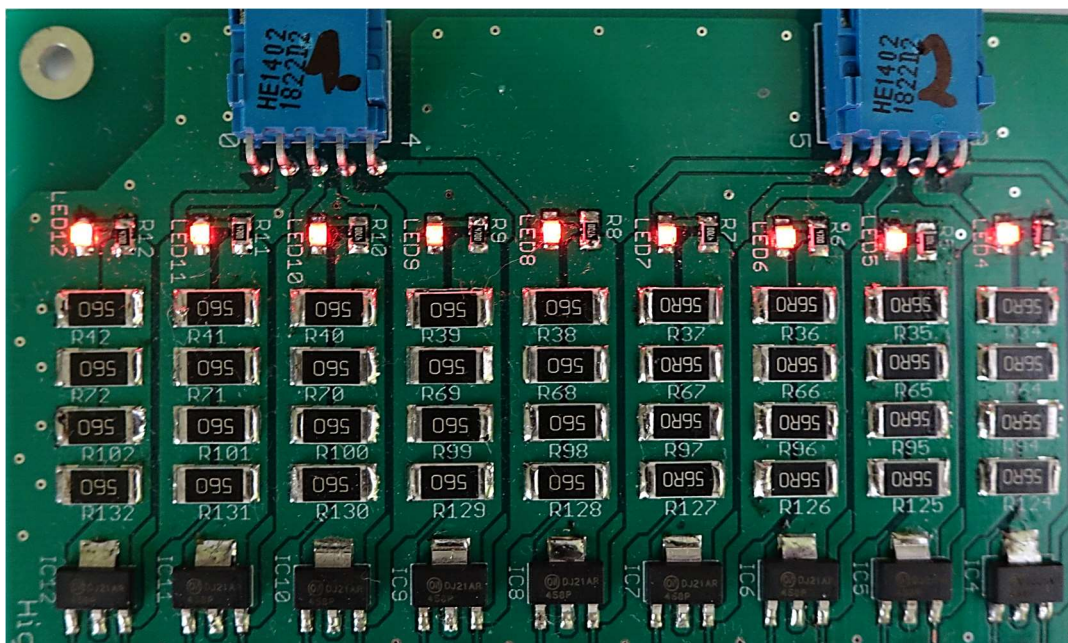
č. článku	Balancér	U_C (mV)	U_{CREF} (mV)	č. článku	Balancér	U_C (mV)	U_{CREF} (mV)
1	OK	3493	3490	16	OK	3512	3510
2	OK	3494	3490	17	OK	3492	3490
3	OK	3514	3510	18	OK	3493	3490
4	OK	3490	3490	19	OK	3508	3510
5	OK	3505	3510	20	OK	3514	3510
6	OK	3499	3500	21	OK	3498	3500
7	OK	3511	3510	22	OK	3513	3510
8	OK	3513	3510	23	OK	3517	3520
9	OK	3492	3490	24	OK	3494	3490
10	OK	3504	3500	25	OK	3501	3500
11	OK	3496	3500	26	OK	3507	3510
12	OK	3511	3510	27	OK	3508	3510
13	OK	3506	3510	28	OK	3491	3490
14	OK	3502	3500	29	OK	3495	3500
15	OK	3493	3490	30	OK	3497	3500

Tabulka 10: Hodnoty měřených a referenčních teplot

č. čidla/ teplota	1	2	3	4	5	6
T_C (°C)	20	20	21	20	21	21
T_{REF} (°C)	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5	20,5



Obrázek 36: Zařízení BMS se sepnutými balančními obvody a připojenými články



Obrázek 37: Detail několika sepnutých balančních obvodu zařízení BMS

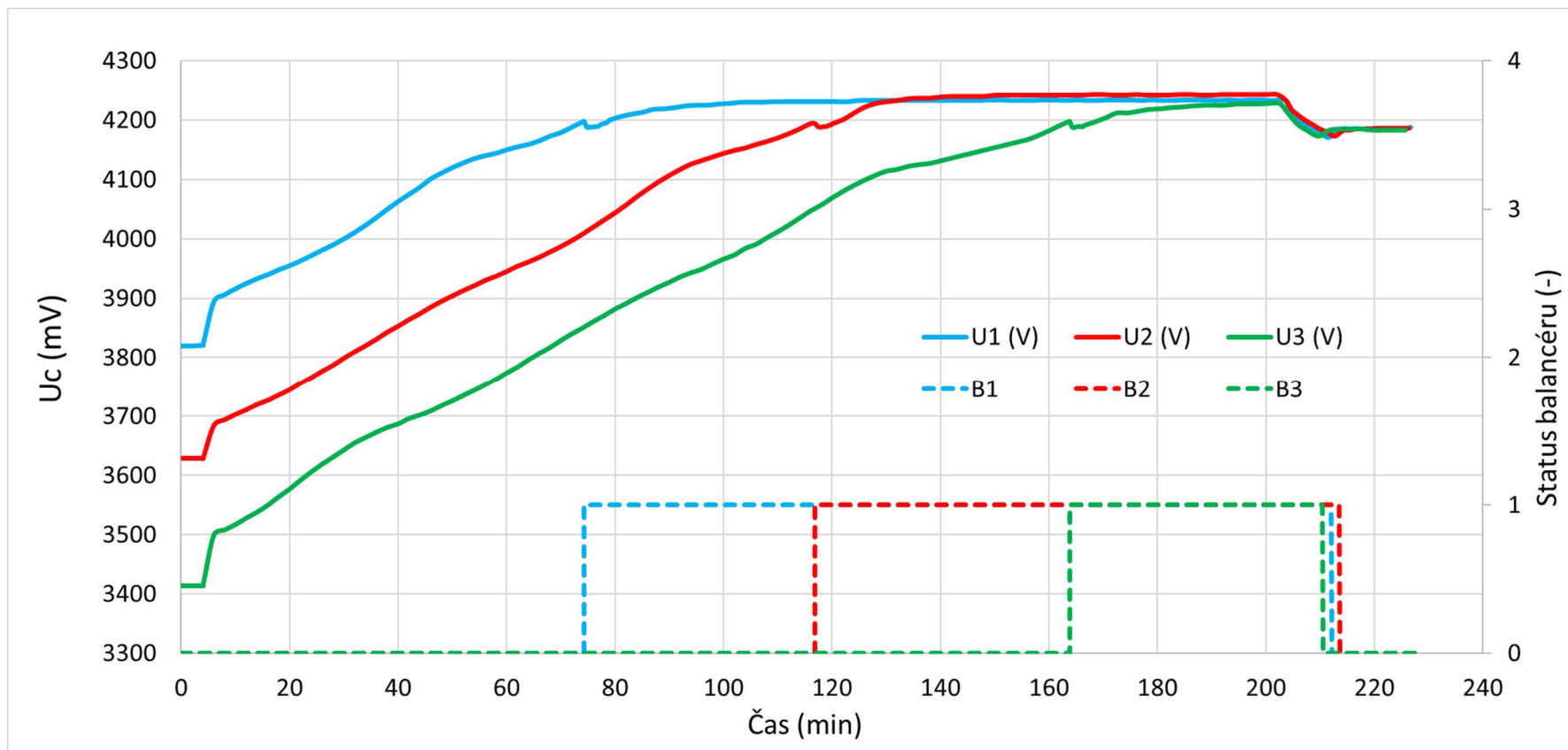
8.2 Test funkčnosti č. 2 zařízení BMS

Druhý test slouží k ověření správnosti spínání balančních obvodů jednotlivých článků při dosažení maximálního stanoveného nabíjecího napětí U_{MAX} . Ta je v případě Li-ion článků stanovena na 4200 mV. Při jejím překročení musí dojít k sepnutí balančního obvodu, a část nabíjecího proudu tak začne procházet přes balanční rezistory. Hlavním úkolem balančního obvodu je zajistit, aby všechny sériově spojené články měly po nabití stejnou hodnotu napětí U_C , jinak řečeno, nedovolit jejich rozbalancování.

Hodnota napětí, při které dojde k vypnutí balančního obvodu, musí být menší než hodnota, při které došlo k jeho sepnutí. To je dáno tím, že při odpojení zátěže (balančního rezistoru) dojde k nárůstu napětí článků U_C a balanční obvod by opětovně sepnul, čímž by se článek zatížil a jeho napětí by následně kleslo, což by znovu vedlo k vypnutí balančního obvodu. Děj by se opakoval a systém by kmital mezi těmito stavy. Proto je hodnota napětí, při které dojde k vypnutí balančního obvodu, nastavena na 4170 mV. Tato hodnota byla určena na základě podmínky pro splnění hystereze a nejistoty měření integrovaného obvodu LTC6802-1, která činí 0,25 %.

8.2.1 Popis provedení testu č. 2

Test byl uskutečněn na bateriovém uložení skládajícím se z 30 sériově zapojených Li-ion článků Sony VTC6. Během testu byly měřeny celkem 3 články, přičemž každý z nich byl testován jiným měřicím obvodem LTC 6802-1, čímž došlo zároveň k ověření funkčnosti předávání dat mezi jednotlivými měřicími členy. Vybrané články byly nabíjeny odděleně pomocí nabíjecích modulů pro Li-ion články. Tento modul obsahující integrovaný obvod TC4056 nabíjí článek CC/CV režimem. Hodnota nabíjecího proudu I_{CC} v CC části nabíjecího cyklu je 1000 mA. Hodnota nabíjecího napětí U_{CC} v CV části nabíjecího cyklu je 4200 mV \pm 1%. Nabíjení bylo ukončeno po ustálení napětí U_C všech článků. Průběh napětí jednotlivých článků U_C a status balančních obvodů je zachycen na následujícím grafu. Stav balančního obvodu je znázorněn pomocí logické proměnné „*status balancéru*“. Hodnota 1 představuje sepnutý a 0 vypnutý balanční obvod.



Obrázek 38: Průběhy měřených veličin při testu č. 2

8.2.2 Popis naměřených dat

Články určené pro měření byly před provedením testu záměrně rozbalancovány na hodnoty napětí $U_1 = 3825$ mV, $U_2 = 3628$ mV a $U_3 = 3414$ mV. Rozdíl napětí nejvíce nabitého a nejméně nabitého článku byl tedy více jak 400 mV. Nabíjení článků začalo v čase 2 minut od počátku měření. Napětí jednotlivých článků postupně stoupala až do hodnoty 4200 mV, kde došlo, ve všech třech případech, k jeho relativně malému, ale náhlému poklesu. Tento pokles byl způsoben sepnutím příslušného balančního obvodu. Zařízení BMS tedy správně zareagovalo na překročení nastavené hodnoty nabíjecího napětí. Jeho následný růst je dán skutečností, že hodnota nabíjecího proudu článku I_C je v tomto čase větší než hodnota balančního proudu I_{BAL} .

Nabíjecí napětí článků dosáhla následujících maximálních hodnot: $U_1 = 4234$ mV, $U_2 = 4234$ mV a $U_3 = 4228$ mV. Rozdíl těchto hodnot oproti požadované hodnotě 4200 mV je dán nejistotou nabíjecího modulu, která činí 1%, tedy 42 mV. Nabíjení bylo ukončeno po ustálení hodnot napětí všech měřených článků v čase 203 minut od počátku měření. Od této chvíle začala napětí článků klesat, až v různých (málo odlišných) časech dosáhla hodnoty 4170 mV, která byla nastavena jako hranice pro vypnutí balančního obvodu. Po jeho vypnutí se napětí článků mírně zvýšila a ustálila se na hodnotách: $U_1 = 4186$ mV, $U_2 = 4186$ mV a $U_3 = 4183$ mV.

8.2.3 Zhodnocení provedeného testu č. 2

Zařízení BMS dokázalo vyrovnat napětí jednotlivých článků na stejnou hladinu. To by v reálné aplikaci vedlo k zamezení prohlubování napětového rozdílu jednotlivých článků při dalších cyklech nabíjení a vybíjení. Tato skutečnost by měla dále za následek prodloužení doby života a bezpečnosti použití článků. Ovšem je nutno dodat, že toto je možné pouze za podmínky, že se hodnota nabíjecího proudu I_C vyrovná s hodnotou balančního proudu I_{BAL} , nebo bude menší.

Při použití navrženého zařízení BMS v aplikaci na elektrickém motocyklu se počítá s tím, že při prvním nabíjení bateriového uložisti budou mít jednotlivé sériově spojené články stejnou hodnotu napětí a úkolem zařízení BMS a jeho balančního obvodu bude pouze zamezení rozbalancování hodnot napětí jednotlivých článků.

8.3 Test funkčnosti č. 3 zařízení BMS

Třetí test navrženého zařízení BMS slouží k ověření vyčítání následujících měřených hodnot:

- nabíjecího elektrického proudu I_C vybraného článku pomocí proudového čidla *LEM HTFS 400-P*,
- teploty okolí T_o ,
- teploty vybraného balančního rezistoru T_{RBAL} ,
- napětí U_I vybraného článku a statusu jeho balancéru.

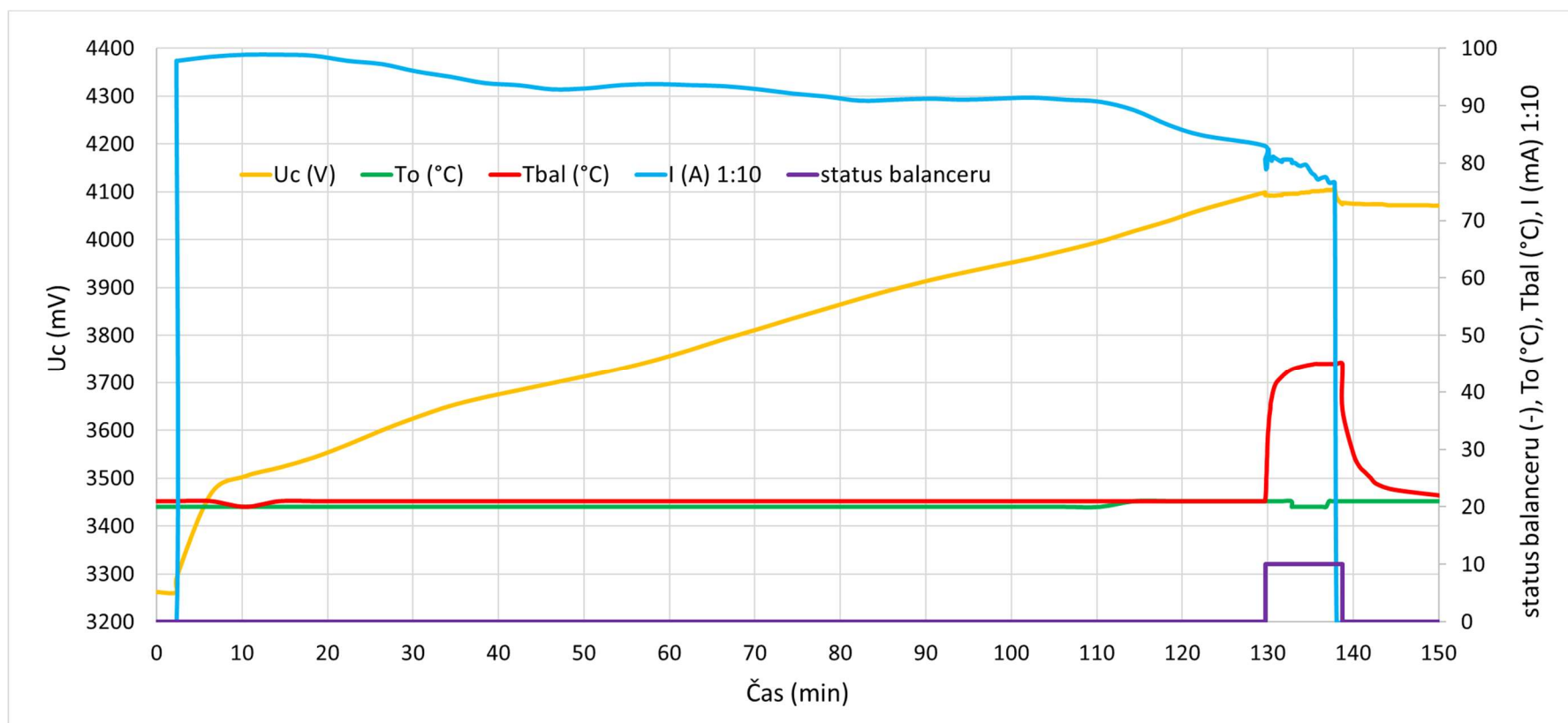
8.3.1 Popis provedení testu č. 3

Test byl opět uskutečněn na bateriovém uložení tvořeném 30 sériově spojenými Li-ion články, ale v tomto případě bylo měřeno napětí U_C pouze jednoho vybraného článku. Během testu byl tento článek nabíjen a hodnota nabíjecího proudu I byla měřena společně s hodnotami teploty okolí T_o a teplotou balančního obvodu T_{RBAL} vybraného článku.

Použité proudové čidlo *LEM HTFS 400* je určeno pro měření proudu o hodnotě řádově 400 A. Ovšem maximální hodnota nabíjecího proudu článku I_{CC} činila pouze 1 A. Proto bylo skrz proudové čidlo namotáno 35 závitů vodiče, kterým procházel nabíjecí proud. Toto vedlo k tomu, že měřená hodnota proudu byla 35krát větší než skutečná hodnota nabíjecího proudu I . Tento způsob měření ovšem vnáší do testu nepřesnost, kterou představuje úbytek napětí na vodiči tvořící závity na proudovém čidle. Hodnota odporu vodiče R_{VOD} byla změřena na 0,3 Ω . Velikost úbytku ΔU_{VOD} je pak závislá na hodnotě nabíjecího proudu, jehož maximální hodnota I_{CC} je zmíněných 1000 mA. Maximální hodnota úbytku je pak rovna:

$$\Delta U_{VOD} = I_{CC} * R_{VOD} = 1000 * 0,3 \text{ mV} = 300 \text{ mV}$$

Tato hodnota není v porovnání s koncovou hodnotou nabíjecího napětí zanedbatelná. V tomto testu je článek nabíjen pouze na hodnotu $U_{MAX} = 4100$ mV. Hodnota napětí, při které dojde k vypnutí balančního obvodu, je nastavena na 4070 mV. Průběh měřených veličin během testu č. 3 je zachycen na následujícím grafu.



Obrázek 39: Průběh měřených veličin při testu č. 3

8.3.2 Popis naměřených dat

Proces nabíjení vybraného článku začal v čase 2:20 minut od začátku měření, kdy nabíjecí proud I vzrostl z hodnoty 0 na hodnotu blízkou 1000 mA (nabíjecí proud je v grafu pro přehlednost vyneseno v měřítku 1:10). Současně nastal růst napětí článku U_C . V čase 130 minut došlo k sepnutí balančního obvodu, neboť hodnota nabíjecího napětí dosáhla stanovené meze 4100 mV. Logická proměnná „*status balancéru*“ je pro zobrazení v grafu 10krát zvětšena. Následkem sepnutí balančního obvodu začala okamžitě stoupat teplota balančního rezistoru označená v grafu jako T_{BAL} .

V čase 138 minut od počátku měření bylo nabíjení ukončeno. Hodnota napětí U_C začala klesat a v okamžiku, kdy dosáhla hodnoty 4070 mV, se balanční obvod vypnul. Následně nastal rychlý pokles teploty balančního obvodu T_{BAL} . Tento rychlý pokles je dán vysokou tepelnou vodivostí měděné vrstvy plošného spoje. Teplota okolí, která je v grafu označená jako T_o , se v průběhu měření pohybovala v rozmezí 20 až 21 °C. Naměřené hodnoty nabíjecího proudu I měly velký rozptyl daný způsobem měření, a proto byly pro zobrazení v grafu vyhlazeny klouzavým průměrem z 5 hodnot.

8.3.3 Zhodnocení provedeného testu č. 3

Výsledkem testu č. 3 navrženého zařízení BMS je úspěšné ověření měření teploty a nabíjecího proudu společně s následným předáním těchto hodnot pomocí CAN sběrnice do PC. Nejistota měření nabíjecího proudu I byla způsobena skutečností, že použité proudové čidlo je určeno na měření řádově 100krát větších hodnot proudu.

9 Závěr

Cílem mé diplomové práce bylo navrhnout jak zapojení, tak i desku plošného spoje zařízení označovaného jako battery management systém, zkráceně BMS. Hlavním úkolem tohoto zařízení je průběžně monitorovat stav článků trakčního bateriového uložení, konkrétně bateriového uložení elektrického závodního motocyklu navrhovaného v rámci budoucího ročníku studentské soutěže MotoStudent. Součástí mé diplomové práce byla také samotná realizace a následné odzkoušení jednotlivých funkcí zařízení BMS.

Text mé diplomové práce je řazen do jednotlivých kapitol, tak aby odpovídal úkonům, kterými jsem při návrhu zařízení prošel. Na začátku práce je uveden obecný popis zařízení BMS, jeho funkce a důvody pro jeho použití v bateriovém úložišti. Dále popisují princip a účel balančního obvodu, který rozšiřuje možnosti zařízení BMS. V následující kapitole se pak zabývám stanovením požadavků na zařízení, které vycházejí jednak z obecných nároků, ale také z pravidel soutěže MotoStudent. Tento krok je dle mého názoru velmi důležitý, neboť je na jeho základě proveden rozbor možných technických řešení.

Nutným krokem byl koncepční návrh bateriového uložení zmiňovaného elektrického motocyklu, a to především z důvodu stanovení počtu analogových vstupů zařízení BMS pro měření elektrického napětí a teploty článků. Z tohoto kroku také vyplynul počet a konkrétní typ článků, které budou použity v bateriovém úložišti. Na základě daných požadavků a rozboru možných technických řešení jsem dále stanovil konkrétní provedení zařízení BMS. Tato část například obsahuje kroky jako zvolení architektury BMS, výběr měřících členů či volbu řídicího obvodu.

Před samotnou realizací zařízení BMS pro monitorování všech článků bateriového uložení jsem provedl návrh prototypu určeného pro měření napětí tři článků a dvou hodnot teploty. Na tomto zařízení jsem tak ověřil nejen vhodnost a funkčnost vybraných technických řešení, ale také odhalil chybu v zapojení. Po tomto kroku již

následoval návrh a realizace konečného zařízení BMS, jehož funkčnost byla ověřena testy popsány v poslední kapitole mé diplomové práce.

Hlavní cíl diplomové práce, tedy návrh a realizace zařízení BMS, byl, dle výsledků provedených testů, splněn. Navrhnuté zařízení je v současné době hardwarově dokončené. Pro samotnou aplikaci na elektrickém motocyklu bude ještě třeba rozšířit řídicí algoritmus, např. o přijímání zpráv z kontroléru trakčního motoru či o řízení nabíjecího procesu. Momentálně toto není možné, neboť není známo, jaký kontrolér a nabíječka budou použity. Hlavní přínos této práce, dle mého názoru, spočívá právě v aplikaci navrženého zařízení BMS na reálné vozidlo s elektrickým pohonem. Vypracováním diplomové práce jsem získal nové zkušenosti a schopnosti, kterými jsou například tvorba desky plošného spoje, orientace v dokumentaci součástek či jejich výběru, nebo také samotné osazování desky plošného spoje součástkami.

10 Použitá literatura

- 1) H.J. Bergveld, Battery Management Systems Design by Modeling, 2001
- 2) Záhlava, V.: Návrh a konstrukce desek plošných spojů. Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha 2005
- 3) STMicroelectronics Inc. RM0090 Reference manual, 2009, <<http://www.st.com>>
- 4) STMicroelectronics Inc. Manual STM32F405xx, 2015, <<http://www.st.com>>
- 5) Linear Technology. *LTC 6802-1 Multicell Battery Stack Monitor*, 2009, <<https://www.analog.com>>

11 Seznam citací

- [1] GARCHE, J. a A. JOSSEN. Battery management systems (BMS) for increasing battery life time. In: TELESCON 2000. Third International Telecommunications Energy Special Conference (IEEE Cat. No.00EX424) [online]. VDE-Verlag, 2000, s. 81-88 [cit. 2019-05-09]. DOI: 10.1109/TELESC.2000.918409. ISBN 3-8007-2546-0. Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/918409/>>
- [2] Texas Instruments, *How active and passive cell balancing works*, [online]. [cit. 13. 5. 2019]. Dostupné z: <https://e2e.ti.com/>
- [3] Kevin Scott, Sam Nork, Active Battery Cell Balancing, [online]. [cit. 13. 5. 2019]. Dostupné z: <https://www.analog.com>
- [4] MotoStudent, 2018 [online]. [cit. 13. 5. 2019]. Dostupné z: <http://www.motostudent.com/>
- [5] MotoStudent, 2019. *Rules & Regulations VI International Competition MotoStudent 2019 – 2020*. [online]. [cit. 13. 5. 2019]. Dostupné z: <http://www.motostudent.com/>
- [6] Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D., *Akumulátory NiFe a NiCd*, [online]. [cit. 13.5.2019]. Dostupné z: <http://www.malavoda.cz/>
- [7] Battery University, 2017. *What's the Best Battery?* [online]. [cit. 13.5.2019]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/>

- [8] Odunlade Emmanuel, 2018. *Different Types of Batteries and their Applications* [online]. Dostupné z: <https://circuitdigest.com/>
- [9] Cnews, 2011. *Li-ion baterie: principy, provoz, rady (1.část)*. [online]. [cit. 13.5.2019]. Dostupné z: <https://www.cnews.cz/>
- [10] Battery University, 2019. *BU-205: Types of Lithium-ion* [online]. [cit. 13.5.2019]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/>
- [11] Battery University, 2019. *BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries* [online]. [cit. 13.5.2019]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/>
- [12] WWW.ANOD.CZ. *www.anod.cz* [online]. [cit. 14.5.2019]. Dostupné z: https://www.anod.cz/xtar_raw_3000mah_30a_18650_sony_vtc6_dobijeci_baterie_XRAB001_18650_3000_S/
- [13] ARCUS, Christopher. *http://redgreenandblue.org* [online]. [cit. 14.5.2019]. Dostupný na WWW: <http://redgreenandblue.org/2018/07/09/battery-pack-dance-off-tesla-model-3-vs-chevy-bolt/>
- [14] ELEKTRIKA.CZ. *https://elektrika.cz* [online]. [cit. 14.5.2019]. Dostupný na WWW: <https://elektrika.cz/data/clanky/clanek.2006-02-05.1331239165>
- [15] CONTROLCONSULTANTSINC.COM. *https://controlconsultantsinc.com* [online]. [cit. 14.5.2019]. Dostupný na WWW: <https://controlconsultantsinc.com/e682d401v3-veris-industries-solid-core-current-transducer-400a-0-333vac-0-5-accuracy.html>
- [16] H.J. Bergveld, *Battery Management Systems Design by Modeling*, 2001
- [17] TE CONNECTIVITY. *Type CRGP Series* [online]. [cit. 14.5.2019]. Dostupný z: https://www.mouser.com/datasheet/2/418/NG_DS_9-1773463-9_A-1358566.pdf
- [18] Linear Technology. *LTC 6802-1 Multicell Battery Stack Monitor*. [cit. 14.5.2019]. Dostupné z: <https://www.analog.com>
- [19] DIGIKEY.COM. *https://www.digikey.com* [online]. [cit. 14.5.2019]. Dostupný z: <https://www.digikey.com/product-detail/en/linear-technology-analog-devices/LTC6801IG-PBF/LTC6801IG-PBF-ND/2241762>
- [20] DE.RS-ONLINE.COM. *https://de.rs-online.com* [online]. [cit. 14.5.2019]. Dostupný z: <https://de.rs-online.com/web/p/stromsensoren/5329227/>

- [21] LEM, 2014. *Current Transducer HTFS 200 .. 800-P*. [online].
[cit. 14.5.2019]. Dostupný z: <https://www.lem.com/en>
- [22] CSSELECTRONICS.COM. <https://www.csselectronics.com> [online].
[cit. 14.5.2019]. Dostupný z: <https://www.csselectronics.com/screen/page/simple-intro-to-can-bus/language/en>
- [23] CS.WIKIPEDIA.ORG. <https://cs.wikipedia.org> [online]. [cit. 14.5.2019].
Dostupný z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface#/media/File:SPI_three_slaves.svg
- [24] BUILDING AUTOMATION PRODUCTS, INC. *100K Thermistor Output Table* [online]. [cit. 14.5.2019]. Dostupné z: <http://www.bapihvac.com>

12 Seznam příloh

12.1 Přílohy v tištěné podobě

- 1) schéma zapojení zařízení BMS

12.2 Přílohy na CD

- 1) schéma zapojení
- 2) deska plošného spoje
- 3) zdrojový kód
- 4) naměřené hodnoty

13 Seznam obrázků

Obrázek 1: Názorné zobrazení nevyužití energie při vybití jen některých článků [3]	18
Obrázek 2: Názorné zobrazení neúplného nabití většiny článků [3].....	19
Obrázek 3: Elektrický závodní motocykl postavený týmem E-CTU lions [4]	21
Obrázek 4: Základní funkční schéma zařízení BMS.....	24
Obrázek 5: Vlevo příklad Li-Ion 18650 článku [12], vpravo bateriové úložiště Tesla 96s46p [13].....	31
Obrázek 6: Schématické znázornění centralizované (vlevo) a decentralizované (vpravo) BMS.....	32
Obrázek 7: Schéma zapojení pasivního balancéru.....	33
Obrázek 8: Příklad obvodu s IO pro aktivní balancování [3]	33
Obrázek 9: Principiální schéma možností měření napětí a teplot, možnosti A), B), C).....	34
Obrázek 10: Příklad provedení bočníku [14]	35
Obrázek 11: Příklad proudového senzoru založeného na Hallově jevu [15]	36
Obrázek 12: Paprskový graf zobrazující poměrné hodnoty článků	42
Obrázek 13: Průběh nabíjecího cyklu Li-ion článků skládajícího se z „CV“ a „CC“ části [16].....	43
Obrázek 14: Závislost kapacity C (Ah) a doby života článku na hodnotě nabíjecího napětí [16].....	44
Obrázek 15: Závislost doby nabíjení na hodnotě nabíjecího proudu [16].....	45
Obrázek 16: Teplotní omezení použitého rezistoru [17].....	49
Obrázek 17: Integrovaný měřicí člen LTC6802-1 [19]	50
Obrázek 18: Proudový převodník HTFS 400-P výrobce LEM [20]	51
Obrázek 19: Zapojení proudového převodníku HTFS 400-P	51
Obrázek 20: Vývojový diagram vyhodnocování	53
Obrázek 21: Popis struktury rámce zprávy CAN [22]	54
Obrázek 22: Princip komunikace pomocí SPI [23].....	56
Obrázek 23: Časový průběh komunikace v závislosti na konfiguraci [23].....	57
Obrázek 24: Zapojení hlavních pinů LTC6802-1	59
Obrázek 25: Balanční a filtrační obvod n-tého článku.....	60
Obrázek 26: Příklad teplotní závislosti termistoru [24]	61
Obrázek 27: Zapojení termistorů pro měření teploty bateriového úložiště.....	61

Obrázek 28: Navržený prototyp s integrovaným měřicím obvodem a balančními obvody.....	62
Obrázek 29: Schéma zapojení balancéru článku č. 3, chybné a správné zapojení pinu V+	64
Obrázek 30: Schéma zapojení 3 měřicích obvodů LTC6802-1	66
Obrázek 31: Balanční a filtrační obvod n-tého článku	67
Obrázek 32: Zapojení součástek kolem procesoru STM32F405RGT6.....	68
Obrázek 33: Zapojení 5V a 3,3V napěťového regulátoru.....	69
Obrázek 34: Schéma zapojení signalizace BMS OK a CHARGER.....	69
Obrázek 35: Deska plošného spoje navrženého zařízení BMS	71
Obrázek 36: Zařízení BMS se sepnutými balančními obvody a připojenými články.....	75
Obrázek 37: Detail sepnutých balančních obvodu zařízení BMS	75
Obrázek 38: Průběhy měřených veličin při testu č. 2	77
Obrázek 39: Průběh měřených veličin při testu č. 3	80