



ZÁPADOČESKÁ  
UNIVERZITA  
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Realizace měřicích obvodů Li-ion baterie

Autor práce: Tomáš Polach

Vedoucí práce: Ing. Luboš Streit

Plzeň 2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2012/2013

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

Jméno a příjmení: **Tomáš POLACH**  
Osobní číslo: **E10B0338P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**  
Název tématu: **Realizace měřicích obvodů Li-ion baterie**  
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Navrhněte obvodové řešení měřicích obvodů.
2. Realizujte zapojení i pro možnost venkovního použití.
3. Experimentálně ověřte funkci měřicích obvodů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

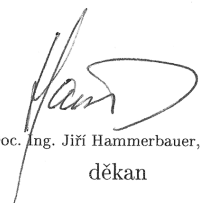
**HAMMERBAUER, J.: Elektronické napájecí zdroje a akumulátory. Plzeň:  
ZČU, 1998.**

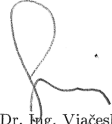
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Luboš Streit**  
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**



L.S.

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

  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

# Abstrakt

Tato práce se zabývá konstrukcí elektronické jednotky, která snímá důležité veličiny LiFeYPO<sub>4</sub> baterií pro potřeby BMS (Battery Management System). Získané informace jsou ve stanoveném formátu odesílané přes sběrnici RS-485 pro další zpracování. Sběrnice je od celého měřicího obvodu galvanicky oddělena. Měřicí jednotka umožňuje také balancování jednotlivých baterií při procesu nabíjení. Jednotka je určena pro venkovní použití. Její konstrukce zamezuje vniku vody či prachu k elektronickým obvodům. Napětí baterie je měřeno s přesností  $\pm 0,1$  V. Práce obsahuje hardwarové řešení jednotky a software pro řídicí mikrokontrolér.

## Klíčová slova

Battery Management System, LiFeYPO<sub>4</sub>, nabíjení akumulátorů, balancování akumulátorů, monitoring baterie, měření napětí, měření teploty, BMS

# Abstract

Polach, Tomáš. *Implementation of measuring circuits Li-ion battery* [Realizace měřicích obvodů Li-ion baterie]. Pilsen, 2013. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Luboš Streit

---

This thesis deals with the construction of the electronic unit, which captures important data of LiFeYPO<sub>4</sub> batteries for the needs of BMS (Battery Management System). The gathered information is sent over RS-485 bus in the specified format for further processing. The bus is electrically isolated from the measuring circuit. The measuring unit also allows the balancing of each battery during charging process. The unit is designed for outdoor use. Its design prevents the ingress of water or dust to electronic circuits. Battery voltage is measured with an accuracy of  $\pm 0,1$  V. The thesis contains hardware solutions of unit and software for microcontroller.

## Keywords

Battery Management System, LiFeYPO<sub>4</sub>, charging accumulator, balancing accumulator, monitoring battery, voltage measurement, temperature measurement, BMS

## Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

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

V Plzni dne 7. června 2013

Tomáš Polach

.....

Podpis

# Obsah

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	viii
Seznam symbolů a zkratk	ix
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Popis obvodu</b>	<b>6</b>
2.1 Senzor teploty . . . . .	7
2.2 RS-485 driver . . . . .	7
2.3 Galvanické oddělení sběrnice . . . . .	8
2.4 Řídicí mikrokontrolér . . . . .	9
2.5 Zdrojová část, měřicí dělič . . . . .	10
2.6 Obvod pro balancování . . . . .	11
<b>3 Komunikační protokol</b>	<b>13</b>
3.1 Obsah přijímaného paketu . . . . .	14
3.2 Obsah odesílaného paketu . . . . .	14
<b>4 Popis programu mikrokontroléru</b>	<b>17</b>
4.1 Popis hlavní smyčky programu . . . . .	18
<b>5 Přesnost měření</b>	<b>21</b>
5.1 Kalibrace měřicí jednotky . . . . .	22
<b>6 Konstrukce měřicí jednotky</b>	<b>24</b>
<b>7 Závěr</b>	<b>27</b>
Reference, použitá literatura	29
Přílohy	30
<b>A Schéma zapojení</b>	<b>30</b>

<b>B</b>	<b>Deska plošných spojů</b>	<b>32</b>
<b>C</b>	<b>Zdrojový kód programu mikrokontroléru</b>	<b>36</b>
C.1	Hlavní část programu . . . . .	36
C.2	Soubor RS485.h . . . . .	41
C.3	Soubor RS485.c . . . . .	41
<b>D</b>	<b>Fotografie konstruované měřicí jednotky</b>	<b>43</b>



# Seznam obrázků

1.1	Baterie LP12V80AH od firmy Winston Battery  Převzato z [2]  . . . . .	1
1.2	Blokové schéma propojení jednotek . . . . .	2
1.3	Průběh napětí a proudu při nabíjení/vybíjení akumulátoru LP12V80AH při teplotě 25°C  Převzato z [2]  . . . . .	3
1.4	BMS-2 od firmy MGM-COMPRO  Převzato z [3]  . . . . .	4
2.1	Blokové schéma měřicí jednotky . . . . .	6
2.2	Součástky připojené k senzoru teploty MCP9700A . . . . .	7
2.3	Schéma zapojení obvodu SN65176B a součástek k němu připojených . . . . .	8
2.4	Schéma obvodu zajišťující galvanické oddělení signálu TXD . . . . .	8
2.5	Schéma připojení vnějších součástek k obvodu ATmega8A . . . . .	9
2.6	Schéma zdrojové části . . . . .	11
2.7	Schéma obvodu pro balancování . . . . .	12
4.1	Vývojový diagram hlavní smyčky programu . . . . .	19
5.1	Korekční křivky pro rostoucí a klesající hodnoty napětí . . . . .	22
5.2	Průběh chyby teplotního senzoru MCP9700A v celém teplotním rozsahu  Převzato z [5]  . . . . .	22
6.1	Okótovaný nákras konstrukčního boxu (v mm [inch])  Převzato z [11]  . . . . .	24
6.2	Fotografie měřicí jednotky s demontovaným čelem. . . . .	25
6.3	Součásti konektoru Superseal (4 piny) . . . . .	26
7.1	Screenshot aplikace umožňující snadnou diagnostiku měřicích jednotek . . . . .	27
A.1	Kompletní schéma měřicí jednotky . . . . .	31
B.1	Vodivý motiv plošného spoje, měřítko 2 : 1 (strana TOP) . . . . .	32
B.2	Vodivý motiv plošného spoje, měřítko 2 : 1 (strana BOTTOM) . . . . .	33
B.3	Osazovací výkres strany TOP, měřítko 2 : 1 . . . . .	33
B.4	Osazovací výkres strany BOTTOM, měřítko 2 : 1 . . . . .	34
D.1	Osazená DPS bez připájených přívodních vodičů součástek umístěných mimo desku - strana TOP . . . . .	43

D.2 Osazená DPS bez připájených přívodních vodičů součástek umístěných mimo desku - strana BOTTOM . . . . .	44
D.3 Sestavená měřicí jednotka . . . . .	44
D.4 Sestavená měřicí jednotka, indikační LED . . . . .	45
D.5 Měřicí jednotka umístěna na LiFeYPO <sub>4</sub> baterii elektromotokáry . . . . .	45

# Seznam tabulek

3.1	Tabulka zvolených adres . . . . .	13
3.2	Struktura přijímaného paketu . . . . .	14
3.3	Význam proměnných v přijímaném paketu . . . . .	14
3.4	Struktura vysílaného paketu . . . . .	15
3.5	Význam proměnných ve vysílaném paketu . . . . .	15
3.6	Formáty odesílaných hodnot . . . . .	16
4.1	Počet průměrovaných vzorků měřených veličin . . . . .	17
4.2	Naprogramování Fuse Low Byte pro aktivaci Brown-out resetu při úrovni napětí 4 V . . . . .	18
5.1	Tabulka paketů odesílaných při kalibraci měřicí jednotky . . . . .	23
B.1	Seznam součástí . . . . .	35

# Seznam symbolů a zkratek

5V_uP3 .....	Napájení pro obvody sběrnice.
ABS .....	Acrylnitril-Butadien-Styrol. Akrylonitrilbutadienstyren.
ADC .....	Analog-to-Digital Converter. Analogově digitální převodník.
AGNG .....	Společná zem analogových obvodů.
AVCC .....	Napájení analogových obvodů měřicí jednotky.
BMS .....	Battery Management System. Systém správy baterií.
CAN .....	Controller Area Network.
CMOS .....	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor.
CPU .....	Central Processing Unit.
CRC .....	Cyclic Redundancy Check. Cyklický redundantní součet.
DNL .....	Differential Non-Linearity. Diferenciální nelinearita.
DPS .....	Deska plošných spojů.
DKAK .....	Decawatt Package.
EEPROM .....	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory. Elektricky mazatelná programovatelná paměť.
$g(x)$ .....	Generující polynom kontrolního součtu.
GND_uP_bat .....	Společná zem číslicových obvodů měřicí jednotky (záporný pól baterie).
GNG_uP3 .....	Společná zem pro odvody sběrnice.
$I_B$ .....	Proud tekoucí do báze tranzistoru Q4.
$I_{bal}$ .....	Proud tekoucí balančním obvodem přes tranzistor Q2.
INL .....	Integral Non-linearity. Integrální nelinearita
LED .....	Light Emitting Diode. Dioda emitující světlo.
LSB .....	Least Significant Bit. Nejméně významný bit.
MOSFET .....	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor. Polem řízený tranzistor.
PWM .....	Pulse Width Modulation. Pulzně šířková modulace.
RAM .....	Random Access Memory. Paměť s přímým přístupem.
RISC .....	Reduced Instruction Set Computing. Redukovaná instrukční sada.
TQFP .....	Thin Quad Flat Package. Tenké čtvercové ploché pouzdro.
$U_{CE}$ .....	Napětí mezi kolektorem a emitorem tranzistoru Q4.

---

$U_{GS}$ .....	Napětí mezi elektrodami gate a source tranzistoru Q2.
$U_{sv}$ .....	Napětí na přívodních vodičích měřicí jednotky.
USART .....	The Universal Synchronous and Asynchronous serial Receiver and Transmitter. Univerzální synchronní a asynchronní sériové rozhraní.
VCC .....	Napájení číslicových obvodů měřicí jednotky.

# 1

## Úvod

Realizovaná měřicí jednotka je určena pro snímání důležitých veličin Li-ion akumulátorů využitých jako zdroj elektrické energie v elektromotokáře. Konkrétně se jedná o čtyři  $\text{LiFeYPO}_4$  akumulátory, typu LP12V80AH (viz obr. 1.1) od firmy Winston Battery (v minulosti firma vystupovala pod názvem Thunder-Sky), spojené do série. Tím lze dosáhnout napětí 48 V při nominální kapacitě 80 Ah. Mezi hlavní přednosti  $\text{LiFeYPO}_4$  akumulátorů oproti klasickým lithiium iontovým patří především bezpečnost. Na rozdíl od klasických lithiových baterií tyto baterie při nadměrném proudovém zatížení, přehřátí nebo mechanickém poškození nevybuchují a nevznítí se. Oproti tomu mají nižší měrnou energii. V případě použité baterie může vybíjecí proud dosáhnout až 150 A trvalého odběru a 900 A špičkově. Nabíjecí proudy jsou nižší, akumulátor lze nabíjet 50 A trvale a 80 A špičkově.

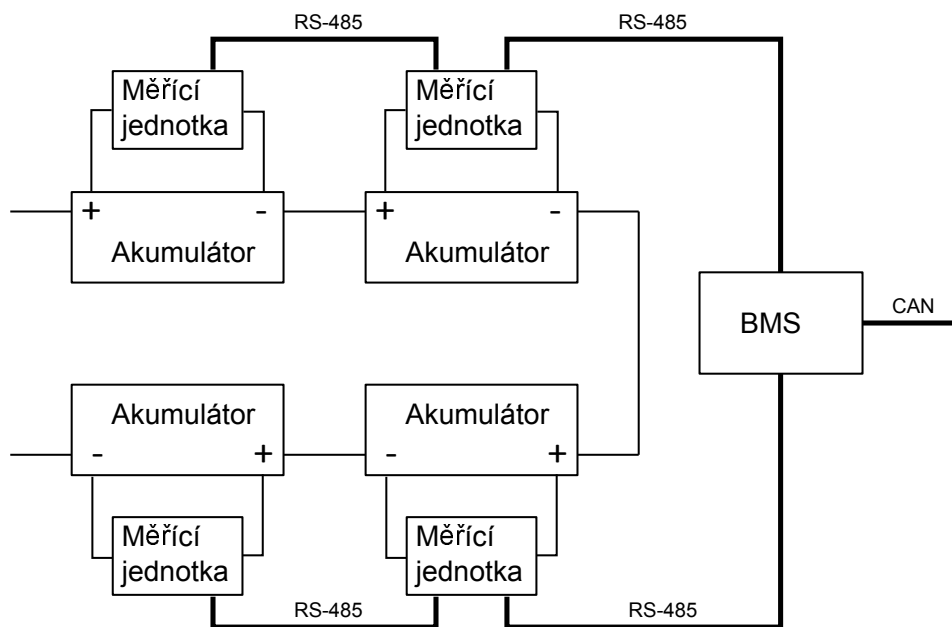


**Obr. 1.1:** Baterie LP12V80AH od firmy Winston Battery [Převzato z [2]]

Akumulátory jsou primárně určeny jako zdroje pro startování spalovacích motorů automobilů a nahrazují běžně používané olovené akumulátory. Každá baterie obsahuje čtyři články, které používají elektrochemické balancování na úrovni elektrolytu. Napětí Li-ion baterie se musí pohybovat v daných mezích, hluboké vybití nebo přebíjení může akumulátor nenávratně poškodit. Proto se baterie  $\text{LiFeYPO}_4$  často vybavují elektronickými

obvody, které zabezpečují jejich nedestruktivní provoz. Výrobce Thunder-Sky předepisuje pro baterii LP12V80AH provozní napětí v rozsahu od 10 V do 17 V při teplotě -30 až 75°C během nabíjení i vybíjení. Při správném používání výrobce uvádí životnost baterií až deset let.

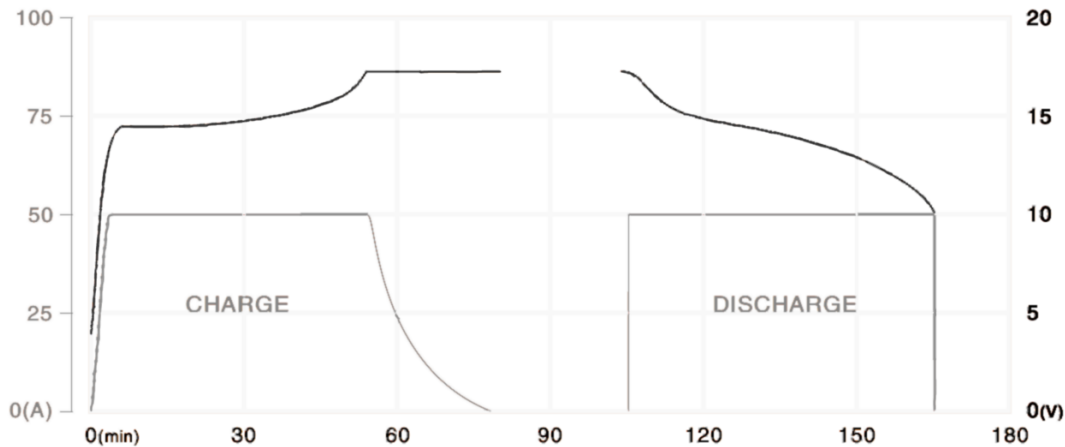
Každý z použitých akumulátorů je vybaven měřicí jednotkou, která snímá jeho napětí a teplotu. Získané informace jsou po sběrnici RS-485 odeslány nadřízené BMS (Battery Management System) jednotce k dalšímu zpracování. BMS jednotka komunikuje s ostatními řídicími obvody elektromotokáry prostřednictvím sběrnice CAN (Controller Area Network). Popisované umístění měřicích jednotek a jejich vzájemné propojení znázorňuje obr. 1.2. Z důvodu sériového řazení akumulátorů každá měřicí jednotka pracuje na jiném potenciálu a musí být od společné sběrnice galvanicky oddělena. BMS jednotka postupně oslovuje dílčí měřicí jednotky a ty obratem po sběrnici odesílají získaná aktuální data ve stanoveném formátu. Tato komunikace probíhá během vybíjení i nabíjení akumulátoru. Aby jednotky z baterie neodebíraly energii i v době své nečinnosti, lze je přes společnou sběrnici odpojit od napájení.



**Obr. 1.2:** Blokové schéma propojení jednotek

Typický průběh napětí a proudu při procesu vybíjení/nabíjení akumulátoru LP12V80AH znázorňuje obr. 1.3. Zpočátku je akumulátor nabíjen konstantním proudem 50 A. Po dosažení napětí 17 V na svorkách baterie se přejde do režimu nabíjení konstantním napětím. Při tomto napětí je baterie nabíjena tak dlouho, dokud nabíjecí proud neklesne na hodnotu blízkou nule (např. na desetinu konstantního nabíjecího proudu). Celý popisovaný proces nabíjení by neměl trvat déle než 90 minut i při plném vybití akumulátoru. Na obr. 1.3 je také znázorněn průběh napětí baterie při vybíjení konstantním proudem o hodnotě 50 A.

Způsob realizace, ve které je každý z akumulátorů vybaven svojí měřicí jednotkou, byl



**Obr. 1.3:** Průběh napětí a proudu při nabíjení/vybíjení akumulátoru LP12V80AH při teplotě 25°C [Převzato z [2]]

zvolen především kvůli relativně vysokému součtovému napětí sériově řazených baterií (až 68 V). V případě použití pouze jedné jednotky, která by měřila napětí všech akumulátorů, by se musela měřená napětí před přivedením na vstup ADC (Analog-to-Digital Converter) dělit relativně velkým poměrem. LSB (Least Significant Bit) by v tomto případě představoval větší hodnotu napětí než při zvoleném způsobu realizace. Všechna napětí by byla měřena proti zemi, tudíž by nebylo měřeno napětí na jednotlivých bateriích, ale součet napětí všech baterií umístěných mezi měřicím bodem a společnou zemí. Pro získání velikosti napětí na dílčích bateriích by se naměřené hodnoty musely od sebe odečítat. To vše by znamenalo nemalé zvětšení nepřesnosti měření. Dále analogové signály by musely být vedeny od svorek akumulátoru do vstupu ADC v měničem zarušeném prostředí dlouhými vodiči. Tudíž lze očekávat, že by se do nich indukovalo nemalé rušení zkreslující měřený údaj. Použité řešení vychází cenově draž než při použití pouze jedné jednotky. Jeden z kladů řešení, kde každá baterie má svoji jednotku, je univerzalita. Případné zvyšování napětí přidáním další baterie do série nebude vyžadovat velké hardwarové změny. Na sběrnici se pouze připojí další měřicí jednotka a mírně se upraví software BMS.

Nepředpokládá se, že při nabíjení baterie akumulátorů nedosáhnou všechny dílčí akumulátory hranici plného nabití současně. Pro zamezení přebíjení akumulátoru, a tím zkracování jeho životnosti, je v měřicí jednotce obvod umožňující průchod nabíjecího proudu mimo akumulátor. Tím se zamezí přebíjení již plně nabitého akumulátoru a umožní se dobití ostatních. Když při nabíjení vzroste napětí na baterii nad určitou mez, měřicí jednotka aktivuje balanční obvod, přes který poteče nabíjecí proud. O tomto stavu je BMS jednotka informována v následujícím odesílaném paketu dat a sníží nabíjecí proud. S ohledem na výkonovou ztrátu vzniklou na balančním obvodu nemůže být tento proud velký. Nepředpokládá se, že by byla docílena stejná velikost nabíjecího proudu a proudu tekoucího balančním odvodem (k dispozici je pouze hrubá regulace nabíjecího proudu). Proud balančním obvodem je nastaven o trochu větší než nabíjecí proud tekoucí z nabíječky



a akumulátor se přes balanční obvod mírně vybíjí. Jestliže napětí akumulátoru klesne pod stanovenou hranici, balanční obvod je deaktivován a akumulátor je znovu dobíjen. V tomto režimu se akumulátor udržuje, dokud ostatní akumulátory nebudou plně nabity. Z hlediska baterií by bylo vhodnější použít regulátor napětí spínající balanční MOSFET pomocí PWM (Pulse Width Modulation) tak, že by udržoval konstantní napětí baterie. Vzhledem k malému množství vyměněné energie při balancování je použito jednodušší hysterezní řízení, kde není zapotřebí stanovovat vhodné konstanty regulátoru. Očekává se, že se tento proces bude provádět pouze jednou za několik nabíjecích cyklů, tudíž by nemusela výrazně vadit delší doba procesu balancování způsobena relativně malým nabíjecím proudem.

Jednotka je určena k provozu ve venkovním prostředí, proto by její konstrukce měla odolávat povětrnostním vlivům. Osazená deska jednotky je umístěna v hliníkové krabici připevněné k akumulátoru. Ta zabraňuje vniknutí vody či prachu do zařízení a zároveň funguje jako chladič pro MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) balančního obvodu. Kabely, přes které probíhá komunikace mezi jednotkami, jsou vyvedeny z krabičky skrz průchodky s vhodným krytím. Celá konstrukce je navržena s ohledem na vystavení vibracím, které vznikají pohybem elektromotokáry. Jednotka musí spolehlivě fungovat ve velkém rozsahu teplot.

Problematikou Battery Management Systemu se zabývá řada firem. Například firma MGM-COMPRO se sídlem ve Zlíně nabízí řešení velice podobného problému. Na každý LiFePo4 článek baterie je připojena DPS (Deska Plošných Spojů), která snímá informace o stavu článku a odesílá je po sběrnici CAN.



**Obr. 1.4:** BMS-2 od firmy MGM-COMPRO [Převzato z [3]]

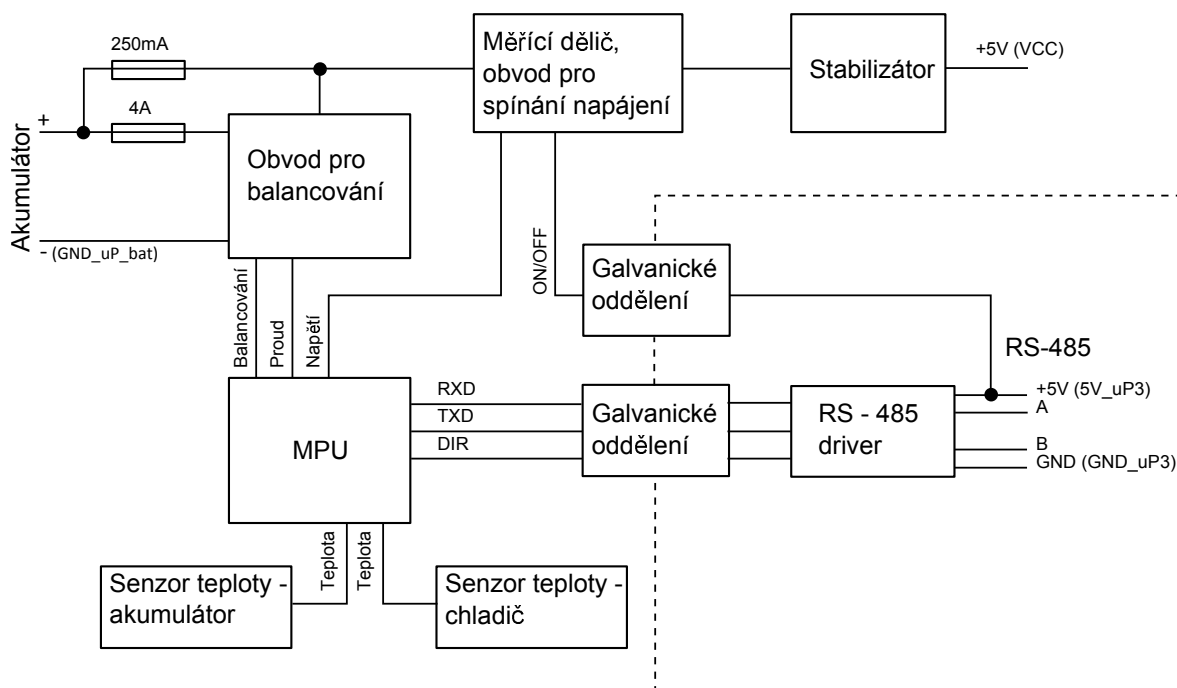
V propagačních materiálech [3] zmiňované firmy popisující produkt BMS-2 je uvedeno: BMS-2 systémy balancují velmi vysokými proudy, a to až 10 A. To ve srovnání s konkurenčními systémy, které balancují nižšími proudy, zajišťuje vyšší rychlost srovnání článků a tedy i rychlost samotného nabíjení. U baterií typu LiFePO<sub>4</sub>, které lze balancovat až v cca posledních 5 % nabíjecího procesu. Systémy BMS-2 představují precizní ochranu a velmi vyspělou diagnostiku všech článků bateriového systému. Monitorují všechny důležité veličiny každého článku, komunikují s nadřazeným systémem (CAN bus) a ukládají podstatné informace i s reálným časem. Je tedy zpětně možné identifikovat co přesně a v jakém čase se s konkrétním článkem dělo. Systémy BMS-2 eliminují vliv vnitřních odporů článků a silových vodičů. Naprosto jedinečným způsobem zajišťují měření teploty výkonového prvku (absolutní eliminace možnosti přehřátí a destrukce).

Na obr. 1.4 je systém BMS-2 nainstalován na baterii sériově řazených článků. Všechny DPS s obvodem získávajícím informace o stavu článku jsou připevněny na společný masivní chladič. Výrobce nabízí i modifikovanou verzi pro použití v letectví, kde je celý systém rozdělen na dvě části. V průběhu vybíjení (za letu) se o články stará pouze regulátor otáček nebo tzv. letová část BMS, která je velmi malá a lehká. Pro nabíjení je použita tzv. pozemní část BMS, která je vybavena balančními obvody s chladičem.

## 2

# Popis obvodu

Ze svorek akumulátoru je přes tavnou pojistku přivedeno napětí do obvodu zajišťující balancování. Balanční MOSFET je ovládán jedním bitem výstupní brány mikrokontroléru. Do A/D převodníku je přivedena informace o velikosti proudu tekoucím balančním tranzistorem. Ke svorkám akumulátoru je také připojen odporový dělič napětí, který snižuje hodnotu měřeného napětí akumulátoru pro zajištění správné funkce A/D převodníku. Po náběhu napětí na sběrnici RS-485 se stabilizátor připojí k napájení a měřicí jednotka oživne. Tuto činnost řídí BMS jednotka a může tak kdykoliv všechny dílčí měřicí jednotky hromadně odpojit od zdroje či resetovat. Připojení napájení a správné spuštění programu mikrokontroléru signalizuje LED. Jako stabilizátor je použit běžný integrovaný obvod řady 7805. Všechny měřené veličiny vyhodnocuje mikrokontrolér ATmega8A z rodiny AVR od firmy Atmel. O výsledku měření informuje nadřazenou BSM jednotku po-

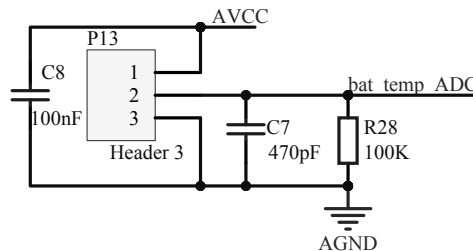


Obr. 2.1: Blokové schéma měřicí jednotky

mocí sběrnice RS-485. Všechny jednotky jsou od sběrnice galvanicky odděleny především z důvodu rozdílných potenciálů, na kterých pracují. Převod logických úrovní z TTL na úroveň standardu RS-485 zajišťuje obvod SN65176B vyráběný firmou Texas Instruments. Snímání teploty zajišťují aktivní termistory MCP9700A od výrobce Microchip. Tento obvod převádí teplotu na analogovou hodnotu napětí, která je měřena A/D převodníkem. Celou strukturu naznačuje blokové schéma na obr. 2.1.

## 2.1 Senzor teploty

Teploty akumulátoru a chladiče balančního tranzistoru jsou měřeny lineárními aktivními termistory MCP9700A. Tímto termistorem je možné měřit teplotu v rozsahu  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$  s maximální chybou  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  v oblasti  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Při teplotě  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  má obvod typicky podle katalogových listů [5] na výstupu hodnotu  $0,5\text{ V}$ , na každý  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  připadá napětí  $10\text{ mV}$ . Z toho plyne, že napětí na výstupu by se mělo pohybovat v rozmezí od  $100\text{ mV}$  do  $1,75\text{ V}$ , jakékoliv jiné napětí je vyhodnocováno jako chyba. Popisovaný integrovaný obvod je imunní vůči účinkům parazitních kapacit, tudíž by mu nemělo výrazně vadit připojení dlouhými vodiči ze vzdáleného místa. Termistor je napájen napětím o velikosti  $5\text{ V}$ , které je blokováno kondenzátorem C8 o velikosti  $100\text{ nF}$ . Výstup pracuje do kapacity  $470\text{ pF}$  z důvodu potlačení rušení superponovaného na výstupním napětí a je přizemněn přes rezistor R28 podle obr. 2.2. To by mělo při případném přerušení vodiče nebo poruše čidla zajistit na vstupu A/D převodníku napětí blízké  $0\text{ V}$ , které je vyhodnocováno jako porucha čidla.

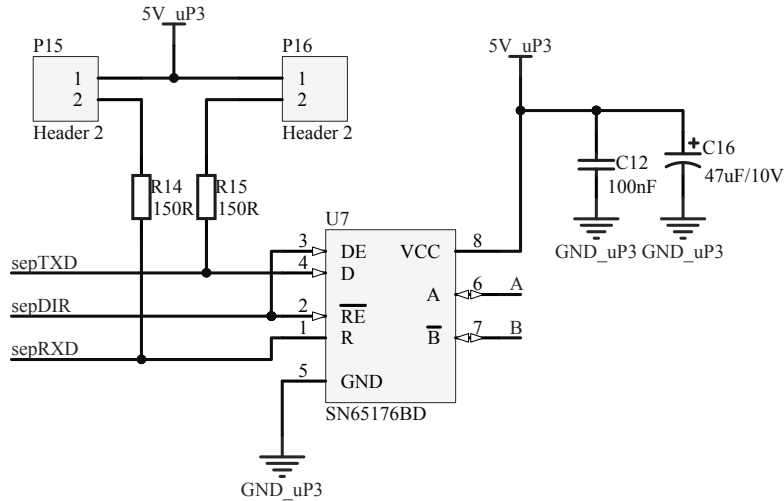


Obr. 2.2: Součástky připojené k senzoru teploty MCP9700A

## 2.2 RS-485 driver

Obvod SN65176B obsahuje tří-stavový diferenciální budič sběrnice a vstupní přijímač splňující ANSI standard TIA/EIA-485-A. Obvod má proudové omezení v obou směrech toku proudu a tepelnou ochranu, která se aktivuje při teplotě přibližně  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Přijímač má vstupní impedanci minimálně  $12\text{ k}\Omega$  a vstupní citlivost  $\pm 200\text{ mV}$ . Signály  $\overline{RE}/\overline{DE}$  připojující přijímač/vysílač ke sběrnici jsou propojeny, tudíž se směr toku dat řídí pouze jedním bitem. Probíhající komunikaci indikují LED (Light Emitting Diode) připojené k signálům TXD a RXD. Protože obvod je napájen po sběrnici ze vzdáleného místa (jednotky metrů),

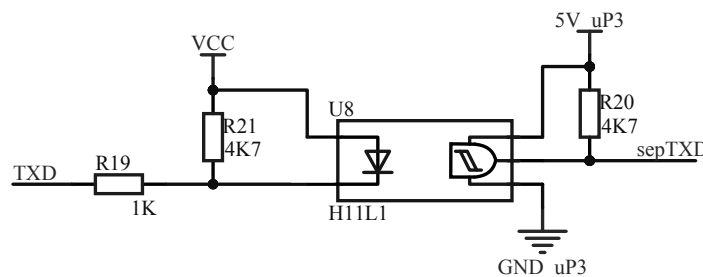
napětí je blokováno, mimo keramického kondenzátoru C12, i tantalovým kondenzátorem C16 o kapacitě  $47 \mu\text{F}$ . Schéma kompletního zapojení obvodu SN65176B včetně doplňujících součástek je na obr. 2.3. Měřicí jednotky umístěné na koncích sběrnice RS-485 jsou osazeny terminačními rezistory R29. Tyto rezistory nejsou na obr. 2.3 znázorněny.



Obr. 2.3: Schéma zapojení obvodu SN65176B a součástek k němu připojených

## 2.3 Galvanické oddělení sběrnice

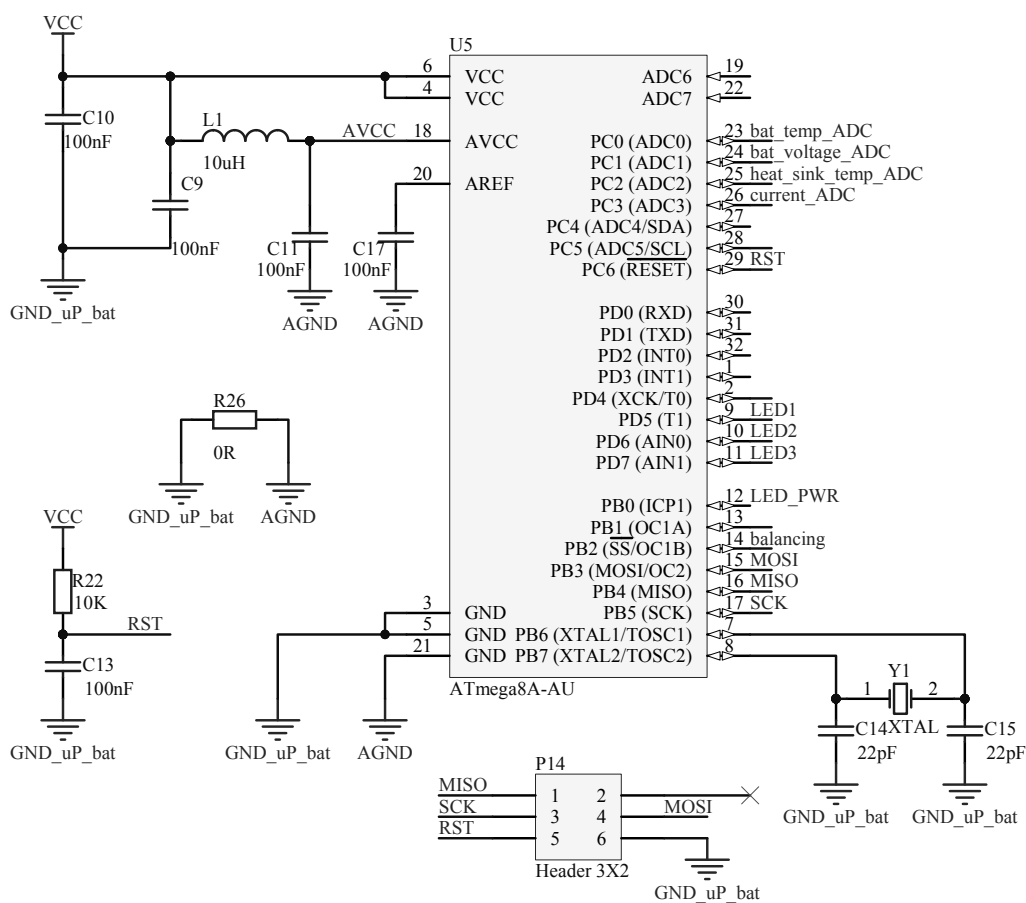
Galvanické oddělení je realizováno optočleny s logickým výstupem s označením H11L1. Obvod obsahuje vysokorychlostní detektor (přenosová rychlost až 1 MHz) s optickou vazbou na gallium-arsenidovou diodu emitující v infračerveném spektru. Výstupní část obvodu tvoří Schmittův klopný obvod, který vykazuje hysterezi, ta zlepšuje odolnost vůči nechtěným zákmitům a tvaruje výstupní signál. Izolační napětí mezi vstupem a výstupem je minimálně 7,5 kV. Na výstupu optočlenu je nízká logická úroveň, pokud diodou teče proud o velikosti minimálně 1,6 mA. Při nízké log. úrovni signálu TXD rezistor R19 omezuje velikost proudu tekoucího diodou na hodnotu přibližně 3,5 mA, to by mělo zajišťovat dostatečnou emitaci záření pro správnou funkci výstupního obvodu optočlenu. Rezistor R21 slouží k bezpečnému zhasnutí diody. Schéma zapojení optronu pro zajištění galvanického oddělení jednoho signálu je uvedeno na obr. 2.4.



Obr. 2.4: Schéma obvodu zajišťující galvanické oddělení signálu TXD

## 2.4 Řídicí mikrokontrolér

ATmega8A je nízkopříkonový CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor) 8-bitový mikrokontrolér založený na AVR RISC architektuře. Procesory řady AVR používají harvardskou architekturu, která se vyznačuje odděleným prostorem pro ukládání programu a dat. Program je ukládán do 8 kB In-System Self-programmable Flash paměti a pro uložení dat je k dispozici statická RAM paměť (SRAM) o velikosti 1 kB. Mikroprocesor obsahuje i paměť EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) o velikosti 512 B, která slouží především pro udržení dat při odpojení napájení. Zmiňovaný mikrokontrolér je vybaven všemi perifériemi potřebnými pro realizaci měřicí jednotky. K jeho výběru přispěla také dobrá dostupnost, nízká cena a propracovaná dokumentace. RC článek tvořený R22 a C13 udržuje mikroprocesor po prudkém náběhu napájení po určitou dobu resetovaném stavu. Protože momentální řešení měřicí jednotky nepotřebuje obzvláště přesný a stabilní zdroj systémových hodin, je k časování mikrokontroléru využito interní RC oscilátor nalaďený na frekvenci 1 MHz. Z důvodu univerzálnosti a možnosti budoucího rozšiřování je měřicí jednotka připravena k osazení krystalem. ATmega8A umožňuje naprogramování FLASH (i EEPROM) paměti přímo v systému přes sériové periferní rozhraní (SPI). K těmto účelům slouží na desce konektor P14. Popis pinů pouzdra a k nim připojených signálů je uveden na obr. 2.5.



Obr. 2.5: Schéma připojení vnějších součástek k obvodu ATmega8A

Pro zpracování analogových signálů je v mikrokontroléru k dispozici 10-bitový A/D převodník s osmi multiplexovanými kanály vyvedenými na piny vstupní/výstupní brány C (v případě použitého TQFP(Thin Quad Flat Package)). ADC obsahuje vzorkovací obvod, který zajišťuje na jeho vstupu konstantní úroveň napětí během celého převodu. Celá konverze trvá 13 hodinových cyklů ADC (první konverze, po zapnutí ADC, trvá 25 hodinových cyklů kvůli inicializaci analogových obvodů). Pro využití maximálního rozlišení by se měla frekvence hodin ADC pohybovat v rozmezí od 50 kHz do 200 kHz, což je zajištěno správným nastavením předděličky hodin ADC. Z toho vyplývá, že převodník může pracovat rychlostí až 15 kSPS (Samples per second). Jako referenční hodnota napětí ADC je využita vnitřní reference generována z bandgap obvodu a zesílená interním zesilovačem na hodnotu 2,56 V. Bandgap reference zajišťuje teplotní nezávislost referenčního napětí. V případě využití interního referenčního napětí se v katalogových listech [4] doporučuje připojení kondenzátoru mezi pin AREF a společnou zemí. Z důvodu potlačení rušení pronikajícího z napájení je ADC a celý analogový obvod napájen přes LC filtr tvořený součástkami L1 a C11.

Komunikace s BSM jednotkou probíhá přes synchronní/asynchronní sériové rozhraní USART (Universal Synchronous and Asynchronous serial Receiver and Transmitter) v asynchronním režimu modulační rychlostí 9600 Bd. Při návrhu byl využit Multi-processor Communication mode, při kterém účastníci posílají rámce o velikosti 9 bitů, kde 9. bit vyjadřuje, zda posílaný byte představuje adresu či data. Jestliže je 9. bit v logické jedničce, jedná se o přenos adresy a všichni účastníci komunikace tento rámec přijmou. V opačném případě se jedná o rámec s daty a přijímá ho pouze jednotka, která byla některým předcházejícím rámcem naadresovaná.

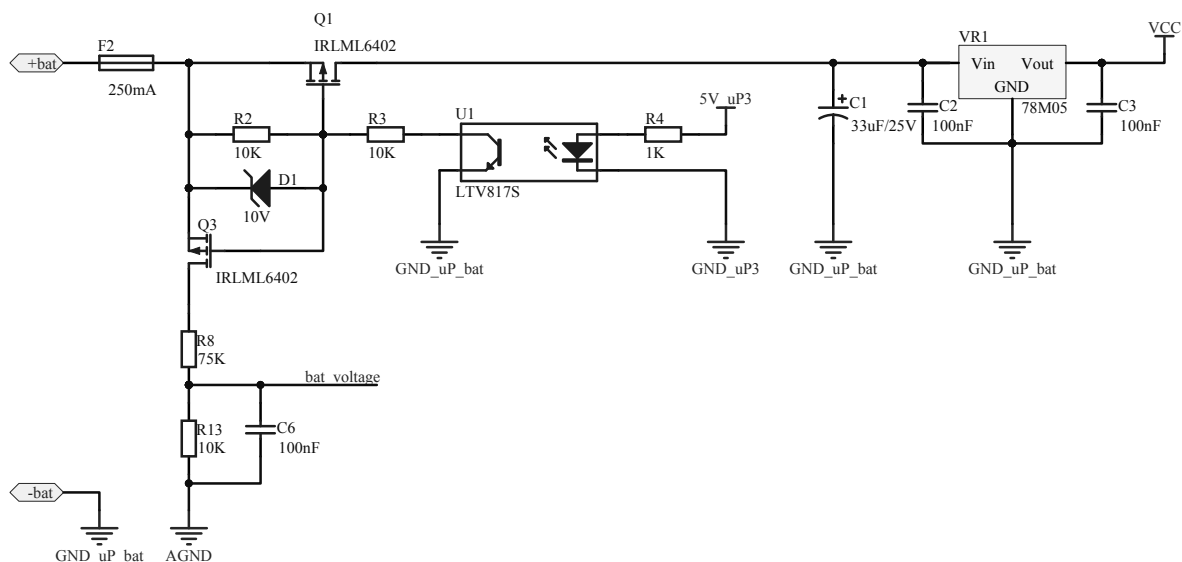
## 2.5 Zdrojová část, měřicí dělič

Tranzistor Q1 při náběhu napětí na sběrnici připojí stabilizátor k napájení. Stejný signál otevírá i tranzistor Q3, který propustí proud do odporového děliče upravující měřené napětí na potřebnou hodnotu. Oba MOSFET jsou spínány a galvanicky odděleny od jiného potenciálu sběrnice optronem U1. Rezistor R4 omezuje proud luminiscenční diodou optronu na hodnotu cca 4 mA, která by měla být dostatečná k bezproblémové saturaci fototranzistoru při kolektorovém proudu až 5 mA. Proud fototranzistorem stanovují rezistory R2 a R3 na hodnotu, která by neměla překročit 2 mA. Průtok proudů při otevření fototranzistoru vytvoří na rezistoru R2 úbytek napětí, který je shodný s napětím mezi elektrodami gate a source obou MOSFET a způsobí jejich otevření. Rezistor R2 odvádí především při uzavřeném fototranzistoru optronu z elektrody gate obou tranzistorů Q1 i Q3 do společné země případné naindukované napětí, které by mohlo způsobit jejich nechtěné otevření. Nárůstu napětí na R2 nad přípustnou mez a následné zničení MOSFET zabraňuje Zenerova dioda D1.

Odporový dělič sloužící pro snížení měřeného napětí je tvořen rezistory R8 a R13. Dělicí

poměr je stanoven na 1 : 7,5. Pro plné vybuzení ADC ( $U_{ref} = 2,56 \text{ V}$ ) je potřeba na vstupu děliče napětí o velikosti 21,76 V, což představuje maximální měřitelnou hodnotu. Provozní napětí akumulátoru by se mělo pohybovat od 10 V do 17 V. S ohledem na přesnost měření jsou použity rezistory s tolerancí  $\pm 0,1\%$ . Oba rezistory mají stejnou teplotní závislost, tudíž by se neměla na výstupním napětí výrazně projevit. K měřicímu děliči sériově připojený MOSFET má podle katalogových listů v otevřeném stavu mezi elektrodami source a drain odpor  $0,05 \Omega$ , což vzhledem k velikostem R8 a R13 lze zanedbat. Neočekává se, že by napětí na akumulátoru rychle měnilo svou velikost. Tato skutečnost umožňuje připojení kondenzátoru C6 mezi vstup ADC a společnou zem. Zmíněný kondenzátor pak odfiltruje ze signálu superponované zvlnění způsobené rušením.

Napájecí napětí mikrokontroléru, senzorů teploty a dalších obvodů je stabilizováno integrovaným obvodem 78M05 na hodnotu 5 V. Obvod je v pouzdře DPAK (Decawatt Package) určeném pro povrchovou montáž. Stabilizátor může při dobrém chlazení dodávat do obvodu proud až 500mA. Kondenzátory C2 a C3 zlepšují stabilitu stabilizátoru. Schéma celé zdrojové části je uvedeno na obr. 2.6.



Obr. 2.6: Schéma zdrojové části

## 2.6 Obvod pro balancování

Balanční proud je ovládán unipolárním tranzistorem Q2. Na tranzistoru Q2 se přebytečná energie, která již nemůže být ukládána do akumulátoru, mění v teplo. Vzniklá tepelná energie se přes hliníkovou krabičku, sloužící mimo jiné i jako pasivní chladič, odvádí do okolí. Teplota chladiče je měřena senzorem MCP9700A a kontrolována, aby se předešlo poškození tranzistoru vlivem vysoké teploty. Obvod je navržen tak, aby balanční proud byl regulován na konstantní hodnotu. Schéma regulačního odvodu naznačuje obr. 2.7. Podle druhého Kirchhoffova zákona je součet napětí na R7 a  $U_{GS}$  tranzistoru Q2 rovno napětí





# 3

## Komunikační protokol

Veškerá komunikace probíhá přes synchronní/asynchronní sériové rozhraní USART v asynchronním režimu podle standardu RS-485. Zařízení mezi sebou komunikují modulační rychlostí 9600 Bd. BMS jednotka cyklicky oslovuje jednotlivé měřicí jednotky. Každá jednotka je přibližně každou sekundu oslovena a po obdržení kompletního paketu požadavku obratem odpovídá. Jestliže BMS jednotka nedostane od kterékoliv měřicí jednotky odpověď do pěti sekund, vyhlásí chybu. Velikost odesílaných rámců je 9 bitů. Osm bitů představují data a devátým bitem je odlišován rámeček obsahující adresu od rámce nesoucí data. Každý rámeček je uvozen startbitem a ukončen jedním stopbitem. Adresy jednotlivých jednotek jsou uvedeny v tab. 3.1. Jejich hodnota je volena s ohledem na dosažení velké Hammingovy vzdálenosti. To by mělo zamezit nechtěné záměně adres vlivem jedné chyby vzniklé na komunikačním kanálu.

Zařízení	Adresa
BMS jednotka (master)	0x00
Měřicí jednotka č. 1 (slave)	0x11
Měřicí jednotka č. 2 (slave)	0x22
Měřicí jednotka č. 3 (slave)	0x44
Měřicí jednotka č. 4 (slave)	0x88

**Tab. 3.1:** Tabulka zvolených adres

Pro detekci chyb je na konec každého paketu přidán byte s cyklickým redundantním součtem (CRC - Cyclic Redundancy Check). Výpočet CRC není složitý a lze jej snadno implementovat i v mikropočítači s nižším výpočetním výkonem. Při zvolení vhodného generujícího polynomu jde o velmi účinný detekční nástroj. Byl zvolen polynom generující 8-bitový součet, označovaný jako Dallas/Maxim 8bit CRC, určený především pro sériovou komunikaci na jednovodičové sběrnici. Přesná podoba generujícího polynomu je uvedena v rov. 3.1. Devátý bit rámce rozlišující adresu od dat není v kontrolním součtu zahrnut.

$$g(x) = x^8 + x^5 + x^4 + 1 \quad (3.1)$$

V případě odhalení chyby se celý paket zahodí a jednotka bude znovu oslovena v dalším cyklu. Použitým polynomem lze detekovat:

- jakákoliv jednonásobná chyba kdekoli v rámci 64-bitového čísla
- všechny dvoubitové chyby kdekoli v rámci 64-bitového čísla
- jakýkoliv shluk chyb, který může být až 8 bitů velký (1-8 bity nesprávné)
- většinu shluků chyb větších než 8 bitů

### 3.1 Obsah přijímaného paketu

BMS jednotka odesílá pakety o velikosti tří bytů. Paket začíná adresovacím bytem, po něm následuje byte označovaný jako STATUS\_BMS. Bitem Balancing informuje měřicí jednotku, zda bylo vyhověno požadavku na snížení nabíjecího proudu při procesu balancování. Tento bit je nulován až po ukončení nabíjení (jestliže nabíjecí proud je snížen Balancing = 1). Dále obsahuje informaci, zda je elektromotokára v režimu jízdy či nabíjení. Celý paket je zakončen kontrolním CRC.

Adresa	STATUS_BMS	CRC
--------	------------	-----

**Tab. 3.2:** Struktura přijímaného paketu

Byte	Bit	Označení	Význam
STATUS_BMS	0	Balancing	bitová informace o snížení nabíjecího proudu
STATUS_BMS	1	Charge	0: režim jízda, 1: režim nabíjení
STATUS_BMS	2:7	-	reserved

**Tab. 3.3:** Význam proměnných v přijímaném paketu

### 3.2 Obsah odesílaného paketu

Odesílaný paket se skládá z osmi bytů. Po prvním adresovacím bytu následují čtyři byty nesoucí informaci o napětí a teplotě baterie. Obě hodnoty jsou odesílány v podobě 16 bitového čísla s pevnou desetinnou čárkou. Přesné rozsahy a formáty čísel jsou uvedeny v tab. 3.6. Pokud právě dochází k procesu balancování, je informace o teplotě baterie ovlivněna teplem vznikajícím na balančním MOSFETu, ale po korekci dle teploty chladiče je stále hlídána. V bytu STATUS\_BAT je využit pouze jeden bit sloužící jako signalizace požadavku na snížení nabíjecího proudu. Zároveň indikuje činnost balančního obvodu. I když může být v průběhu balancování opakovaně nastavován a nulován v důsledku

Adresa	U_bat_H	U_bat_L	TEMP_bat_H	TEMP_bat_L	STATUS_BAT	ERR_BAT	CRC
--------	---------	---------	------------	------------	------------	---------	-----

**Tab. 3.4:** Struktura vysílaného paketu

hysterezního řízení balančního tranzistoru, nabíjecí proud je snížen při prvním požadavku a zůstává v tomto stavu až do konce nabíjení.

Všechny vyhodnocované chyby jsou soustředěny do jednoho bytu označovaného jako ERR\_BAT. Měřicí jednotka vyhodnocuje jako chybové stavy podpětí nebo přepětí na baterii, přehřátí baterie či přehřátí balančního MOSFETu, což by mělo jednotku chránit při balancování před poškozením i v abnormálních teplotních podmínkách. Např. při vystavení prudkému slunečnímu záření. Při nízké (nulové) nebo naopak příliš vysoké hodnotě balančního proudu během balancování je vyvolána chyba BalCurrentErr. Při vzniku této chyby je pravděpodobné, že došlo k poruše balančního obvodu (např. přepálená tavná pojistka, poškozený MOSFET). Při balancování by mělo napětí na baterii vlivem mírného vybití klesat. Pokud se tak nestane, je nastavena chyba BalanceErr. Pro BMS jednotku

Byte	Bit	Označení	Význam
U_bat_L	0:7	-	napětí baterie - low byte
U_bat_H	0:7	-	napětí baterie - high byte
TEMP_bat_L	0:7	-	teplota baterie - low byte
TEMP_bat_L	0:7	-	teplota baterie - high byte
STATUS_BAT	0	BalancingRequest	1: požadavek na snížení nabíjecího proudu
STATUS_BAT	1:7	-	reserved
ERR_BAT	0	Overvoltage	napětí větší než 16,5 V
ERR_BAT	1	Undervoltage	napětí nižší než 10,5 V
ERR_BAT	2	OverTemp	přehřátí baterie $t > 40$ °C
ERR_BAT	3	OverTempBal	přehřátí balančního tranzistoru
ERR_BAT	4	BalCurrentErr	neočekávaný proud balančním tranzistorem
ERR_BAT	5	BalanceErr	při balancování neklesá U_bat
ERR_BAT	6	TempErr	chyba měření teploty baterie
ERR_BAT	7	TempBalErr	chyba měření teploty balančního tranzistoru

**Tab. 3.5:** Význam proměnných ve vysílaném paketu

tato chyba znamená nutnost dalšího snížení nabíjecího proudu. V případě neočekávaného výstupního napětí senzoru teploty (např. v důsledku přerušení přívodního vodiče) jsou nastavovány chyby TempErr či TempBalErr. Výstupní napětí senzorů by se mělo pohybovat v rozsahu od 100 mV do 1,75 V. Všechny ostatní hodnoty napětí jsou vyhodnocovány jako chybné. Poslední byte paketu tvoří kontrolní suma.

Formát čísla znázorňuje využití velikosti dvou bytů pro vyjádření měřené hodnoty. V případě TEMP\_bat je nejvyšší bit použit pro vyjádření znaménka, 8 bytů pro celočí-

selnou část (vyjadřuje rozsah) a 7 bitů pro reprezentaci desetinné části čísla. Výslednou hodnotu měřené veličiny lze snadno získat dělením hodnoty proměnné násobičem.

Proměnná	Velikost	Typ	Formát	Rozsah	Násobič	Přepočet
U_bat	16 bit	unsigned	5.11	0; 31,9995	2048	$2048 = 1 \text{ V}$
TEMP_bat	16 bit	signed	8.7	-256; 255,992	128	$128 = 1 \text{ °C}$

**Tab. 3.6:** Formáty odesílaných hodnot

## 4

# Popis programu mikrokontroléru

Celý program zabírá přibližně 25% programové paměti. Datová paměť je využita z 35%. Díky tomu je v budoucnu bez větších problémů možné funkci jednotky rozšířit. Měřené veličiny jsou neustále průměrovány klouzavým průměrem. To do jisté míry potlačuje nepřesnosti měření vzniklé nahodilou chybou nebo šumem. Množství průměrovaných vzorků se u jednotlivých měřených veličin liší a je dáno kompromisem mezi náročností na datovou paměť a vyhlazeností průměrované veličiny. Počet průměrovaných vzorků u jednotlivých veličin je uveden v tab. 4.1. Měření proudu tekoucím balančním MOSFETem je pouze orientační, proto je průměrován pouze ze čtyř vzorků. Program byl psán s ohledem na snadnou změnu konstant vyvolávajících chybové hlášení. Všechny důležité mezní hodnoty (např. maximální povolené napětí na baterii, nejvyšší přípustná teplota baterie, ...) jsou definovány na začátku kódu. Bez větších problémů lze modifikovat i množství průměrovaných vzorků. Konstanty sdílené s BMS jednotkou, jako např. adresy, počty bytů paketů, generující polynom CRC a další, jsou uloženy v knihovně RS485.h. Obsahem knihovny je také funkce generující kontrolní součet. Základ funkce je převzat z dokumentace [12] poskytované k senzorům pro měření tlaku a proudění plynu vyráběných firmou SENSIRION.

Měřená veličina	Počet průměrovaných vzorků
Napětí baterie	64
Teplota baterie	32
Teplota chladiče	32
Proud balančním MOSFET	4

**Tab. 4.1:** Počet průměrovaných vzorků měřených veličin

ATmega8A nabízí z důvodu minimalizace rušení A/D převodníku vznikajícího vlivem funkce vnitřních obvodů mikropočítače speciální mód spánku označován jako ADC Noise Reduction, při kterém jsou odpojeny systémové hodiny od CPU (Central Processing Unit), programové paměti a většiny periferních obvodů. Bohužel hodinový signál je odpojen i od jednotky USART, tudíž v tomto módu nelze během převodu přijímat data. V programu je

využit obdobný mód spánku označován jako Idle, který funguje podobně jako ADC Noise Reduction, ale k hodinovému signálu jsou připojeny všechny vstupní/výstupní periferie. Jakmile se mikrokontrolér uspí, je automaticky spuštěn převod. Procesor procitne při vyvolání jakéhokoliv přerušení (nevýhoda módu Idle oproti ADC Noise Reduction módu). Proto je v programu využíváno přerušení pouze od ADC a Timer0. Přerušení vyvolané přetečením Timer0 nastává pouze v době, kdy je ADC neaktivní, tudíž nemůže spánek předčasně ukončit a tím negativně ovlivnit převod.

V mikrokontroléru je aktivován Watchdog Timer, který má vlastní zdroj hodin kmitající frekvenci 1MHz. Watchdog Timer je resetován v každém cyklu hlavní smyčky. Timeout je nastaven na 0,26 s. Pro zajištění správné funkce mikropočítače i při pomalém náběhu napájení je pomocí propojek aktivován Brown-out reset. Tento stav by však při správném používání akumulátorů neměl nastat. Brown-out reset udržuje mikrokontrolér v resetovaném stavu, pokud se napájecí napětí pohybuje pod úrovní 4 V. Způsob naprogramování nižšího bytu propojek (Fuse Low Byte) pro aktivaci Brown-out resetu je znázorněn v tab. 4.2. Od defaultního naprogramování se liší pouze v bitech BODLEVEL (nastavení úrovně napětí, při kterém dochází k resetu na 4 V) a BODEN (aktivace samotného Brown-out resetu).

Označení	Bit	Hodnota
BODLEVEL	7	0 (naprogramován)
BODEN	6	0 (naprogramován)
SUT1	5	1 (nenaprogramován)
SUT0	4	0 (naprogramován)
CKSEL3	3	0 (naprogramován)
CKSEL2	2	0 (naprogramován)
CKSEL1	1	0 (naprogramován)
CKSEL0	0	1 (nenaprogramován)

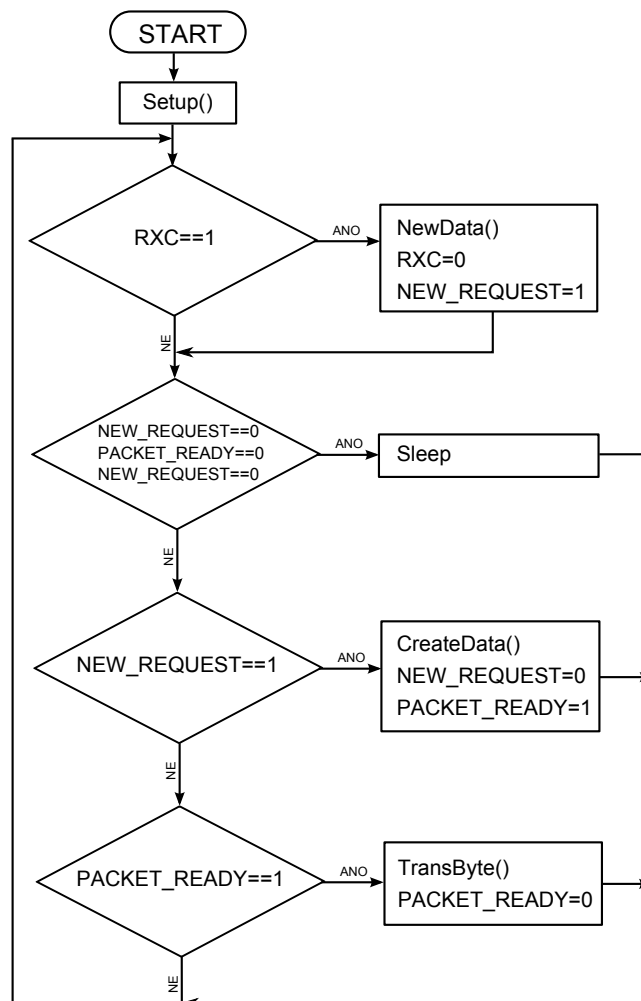
**Tab. 4.2:** Naprogramování Fuse Low Byte pro aktivaci Brown-out resetu při úrovni napětí 4 V

## 4.1 Popis hlavní smyčky programu

Po vstupu do funkce main() jsou nejprve nastaveny registry používaných periférií. To vše je zapouzdřeno ve funkci Setup(), která je použita především z důvodu přehlednosti. Po nastavení bitu globálně povolující přerušení se program dostává do hlavní nekonečné smyčky.

V hlavní smyčce je mikropočítač neustále uspáván a tím spouštěn převod ADC. Po dokončení převodu je vyvoláno přerušení, mikropočítač procitne a vykonává obslužný program. V něm je výsledek převodu uložen na příslušné místo v poli změřených hodnot a aktualizuje se klouzavý průměr. Před návratem do hlavní smyčky je přepnut multiplexer

na vstupu převodníku a v dalším cyklu je měřen signál přiveden na jiný vstup. Takto střídavě jsou měřeny všechny signály. Perioda měření je dána velikostí pole, do kterého se výsledky ukládají (souvisí s počtem průměrovaných hodnot). V případě zvoleného množství průměrovaných vzorků (viz tab. 4.1) je v 33 měřicích cyklech střídavě měřeno: 16x napětí baterie, 8x teplota baterie, 8x teplota chladiče a 1x proud balančním obvodem. Pro kompletní obnovení všech polí je potřeba vykonat 132 měřicích cyklů. Jednou za násobek (volen definicí `RESTORE_PERIOD`) 33 měřicích cyklů (aktualizace 1/4 buněk všech polí) je volána funkce `CreateErrorByte()`, kde jsou přehodnoceny chybové příznaky v bytu `ERR.BAT` a v případě potřeby aktivován/deaktivován balanční obvod. Před vyhodnocováním chyb je k naměřeným hodnotám přičten offset převodníku.



Obr. 4.1: Vývojový diagram hlavní smyčky programu

Mikrokontrolér provádí tuto rutinu, dokud jednotka USART příznakem neoznámí kompletní příjem rámce. Příznakový bit (RXC) je testován v hlavní smyčce a v případě kladného výsledku je volána funkce `NewData()`. Jednotka USART pracuje v Multi-processor Communication módu a příznakový bit oznamující nově přijatá data se nastavuje pouze v případě, když příchozí rámec obsahuje adresu. Pokud adresa obsažena v příchozím rámci souhlasí s adresou měřicí jednotky, je uložena do pole a Multi-processor Communication



mód je vypnut (příznakový bit indukující nový příchozí rámec se nastaví i v případě, že rámec nese data). Po návratu z funkce se měřicí jednotka vrací zpět do rutiny měření a čeká na další příchozí rámec. Po příchodu posledního rámce se provede kontrolní součet přes celý přijatý paket, a pokud souhlasí s hodnotou CRC přijatou v posledním bytu, je nastaven uživatelský příznak `NEW_REQUEST` a spuštěn `Timer0`. Pokud kontrolní suma nesouhlasí, vrací se mikrokontrolér znovu do hlavní smyčky, spouští ADC a čeká se na další naadresování jednotky. `Timer0` slouží pouze pro vytvoření časové prodlevy mezi příjmem/vysláním posledního rámce pro spolehlivé přepnutí driveru sběrnice z přijímače na vysílač nebo opačně.

Nastavený příznak `NEW_REQUEST` znemožní v hlavní smyčce další spouštění převodů a vyvolá spuštění funkce `CreateData()`. Uvnitř této funkce je k naměřeným hodnotám přičten offset převodníku a data jsou upravena tak, aby odpovídala formátu stanovenému v komunikačním protokolu. Z upravených dat a vygenerovaného CRC je do pole nastaven paket, nastaven příznak `PACKET_READY` a vynulován příznak `NEW_REQUEST`. Program se opět vrací do hlavní smyčky, kde je stále zamezeno spouštění dalších převodů.

Pokud je nastaven příznak `PACKET_READY`, driver je přepnut do režimu vysílače a posuvný registr vysílače jednotky `USART` je prázdný, program skáče do funkce `TransByte()`. Ve funkci dochází k nastavení nebo vynulování devátého bitu odesílaného rámce a přesunu příslušného bytu do registru vysílače, což způsobí odeslání. Po návratu zpět do hlavní smyčky mikropočítač pouze čeká na vyprázdnění registru vysílače. V případě vyprázdnění je znovu volána funkce `TransByte()`, která zajistí odeslání dalšího bytu paketu. Po odeslání posledního bytu je smazán příznak `PACKET_READY` a puštěn `Timer0`, přičemž stále je zamezeno spuštění převodu. To je povoleno až v obslužném programu přerušení od události přetečení `Timer0`, ve kterém se přepne driver z vysílače na přijímač. Po návratu je znovu vykonávána rutina, kde je mikropočítač neustále uspáván a tím jsou spouštěny nové převody, dokud od BMS jednotky nepříjde po sběrnici další požadavek.

Celý tento proces je graficky znázorněn ve vývojovém diagramu na obr. 4.1. Jedná se pouze o hrubé znázornění. Není v něm například zohledněna skutečnost, že se pakety skládají z více bytů, které přichází/odchází postupně.

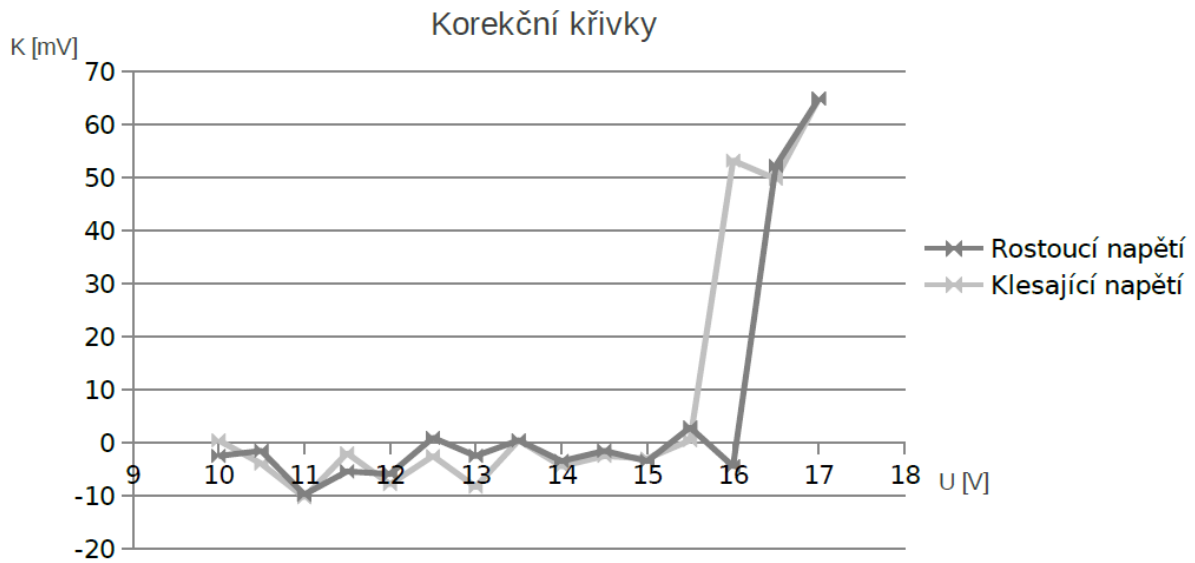
## 5

# Přesnost měření

Rozlišení použitého 10 bitového A/D převodníku je při referenčním napětí 2,56 V rovno 0,0025 V. Jako absolutní přesnost (zahrnující integrální nelinearitu (INL - Integral Non-Linearity), diferenciální nelinearitu (DNI - Differential Non-Linearity), kvantizační chybu, chybu strmosti a offset) výrobce v katalogových listech udává hodnotu 1,75 LSB. To představuje chybu  $\pm 0,004375$  V vztaženou k napětí přivedenému na vstup ADC. V případě měřeného napětí na baterii je tato chyba násobena dělicím poměrem použitého odporového děliče. Po pře-násobení je tedy chyba převodníku rovna  $\pm 0,0372$  V (vztaženo k měřenému napětí baterie). Největší chybu do měření zanáší nepřesnost interního referenčního napětí. Podle katalogových listů [4] se může pohybovat v rozsahu od 2,3 V do 2,8 V. Tato nepřesnost je dána výrobní technologií a tvoří většinou část celkového offsetu převodu. Především z tohoto důvodu je nutné měřicí jednotku kalibrovat. Odesílaná data jsou navíc zatížena zaokrouhlovací chybou. Vyhodnocování chybových stavů je prováděno ještě před zanesením zaokrouhlovací chyby.

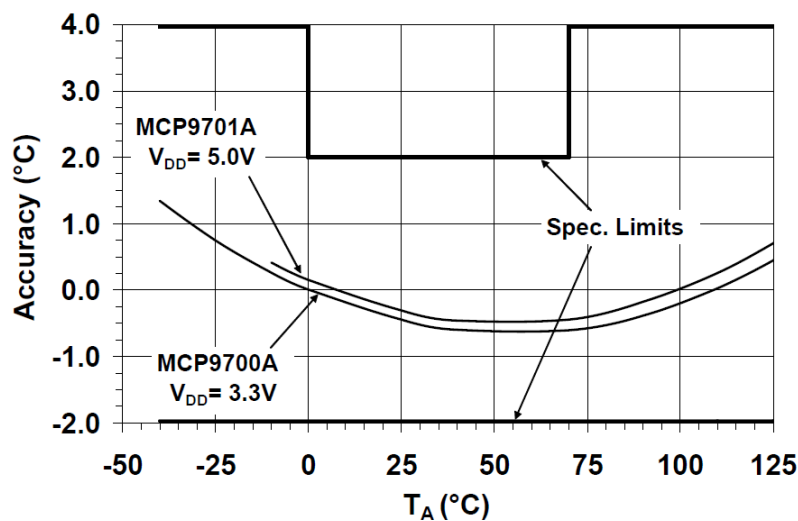
Do měřeného napětí na baterii vnáší chybu i nepřesnost rezistorů tvořící dělič a odpor kanálu MOSFETu, který dělič připojuje k napájení. Oba použité rezistory mají toleranci  $\pm 0,1\%$ . Odpor kanálu otevřeného MOSFETu připojující dělič k napájení se vzhledem ke své nízké hodnotě ( $0,05 \Omega$ ) na měřeném údaji příliš neprojeví. Další nepřesnosti měření napětí způsobuje úbytek napětí na tavné pojistce F2 a na přívodních vodičích. Studené vlákno pojistky má odpor  $0,6 \Omega$ . Na něm se při maximálním předpokládaném odběrovém proudu mikrokontroléru (100 mA) vytvoří úbytek 0,06 V. Hodnota odběrového proudu by se při provozu neměla příliš měnit. Tudíž převládající konstantní složka úbytku napětí na pojistce je zahrnuta v offsetu, který je kalibrováním kompenzován. V měřicím rozsahu byly naměřeny korekční křivky pro rostoucí i klesající hodnoty napětí. Z korekčních křivek na obr. 5.1 je patrné, že měřicí jednotka měří napětí s chybou přibližně  $\pm 10$  mV, ale pouze pokud není balanční obvod v provozu. Při balancování se chyba nepříjemně zvětší. Dále lze z korekčních křivek vyzpozorovat neoptimálně nastavený offset při měření, proto ve většině měřených bodech má korekční konstanta zápornou hodnotu.

Pro měření teplot byl použit teplotní senzor MCP9700A, který oproti klasickému typu MCP9700 vyniká vyšší přesností. Použitý typ senzoru měří v rozsahu od  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $70 \text{ }^\circ\text{C}$



Obr. 5.1: Korekční křivky pro rostoucí a klesající hodnoty napětí

s maximální chybou  $\pm 2$  °C. Skutečná chyba je ale v rozsáhlé oblasti měřených teplot menší. Přesnost senzoru v celém měřicím rozsahu je znázorněna na obr. 5.2. Chyby jsou rozděleny přibližně podle Gaussovy křivky, proto lze chybu průměrováním měřených hodnot částečně eliminovat.



Obr. 5.2: Průběh chyby teplotního senzoru MCP9700A v celém teplotním rozsahu |Převzato z [5]|

## 5.1 Kalibrace měřicí jednotky

Největší nároky na přesnost jsou kladeny u měření napětí baterie. Hodnoty teplot jsou kontrolovány a pouze při překročení limitních hodnot, které jsou voleny s dostatečnou re-

zervou, je provedena patřičná akce. Proto je jednotka kalibrována s ohledem na maximální přesnost měření napětí baterie. V nastavovaném offsetu je tedy zahrnuta i nepřesnost rezistorů děliče a úbytek napětí na pojistce. Tyto složky offsetu by neměly být tak velké, aby došlo k výraznému ovlivnění měření teploty, kde se tyto složky offsetu nevyskytují.

Při kalibraci musí být v programu definovaná konstanta OFFSET rovna nule. Kalibrace se provádí přivedením přesně známého napětí  $U_{sv}$  na napájecí vodiče jednotky. Napětí by mělo být v měřeném rozsahu tj. od 10 do 17 V. Pomocí počítače připojeného na sběrnici RS-485 se přes terminál odešle paket ve tvaru podle tab. 5.1. Podoba odesílaného paketu závisí na adrese kalibrované jednotky. Pro stanovení offsetu je potřebný pouze druhý byte (U\_bat\_H) a třetí byte (U\_bat\_L) příchozího paketu. Konstanta OFFSET se vypočítá podle rov. 5.1 a měřicí jednotka se přeprogramuje programem s přeepsanou konstantou OFFSET.

$$OFFSET = (U_{sv} - \frac{(256 * U\_bat\_H) + U\_bat\_L}{2048}) * \frac{400 * 64}{8,5} \quad (5.1)$$

Takto stanovená hodnota offsetu je zatížena zaokrouhlovací chybou zanesenou do výsledku přepočtem dat do formátu stanoveným komunikačním protokolem. Tuto chybu lze eliminovat zprůměrováním více hodnot konstant OFFSET získané při různém napětí na přívodních vodičích měřicí jednotky.

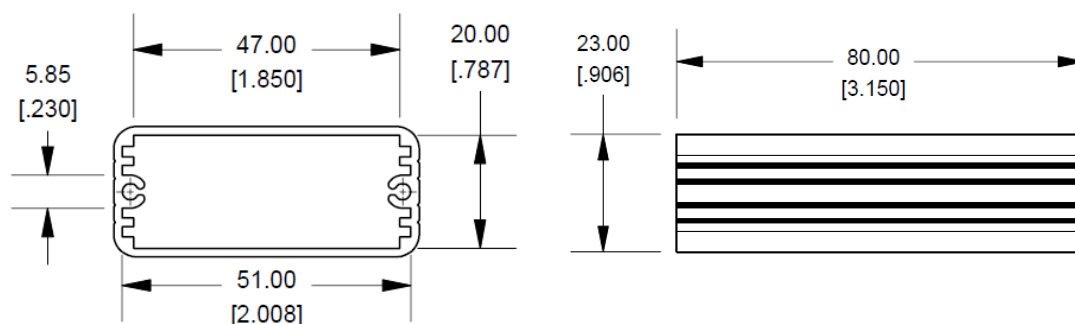
Zařízení	Adresa	Paket
Měřicí jednotka č. 1	0x11	0x11009A
Měřicí jednotka č. 2	0x22	0x220005
Měřicí jednotka č. 3	0x44	0x44000A
Měřicí jednotka č. 4	0x88	0x880014

**Tab. 5.1:** Tabulka paketů odesílaných při kalibraci měřicí jednotky

## 6

# Konstrukce měřicí jednotky

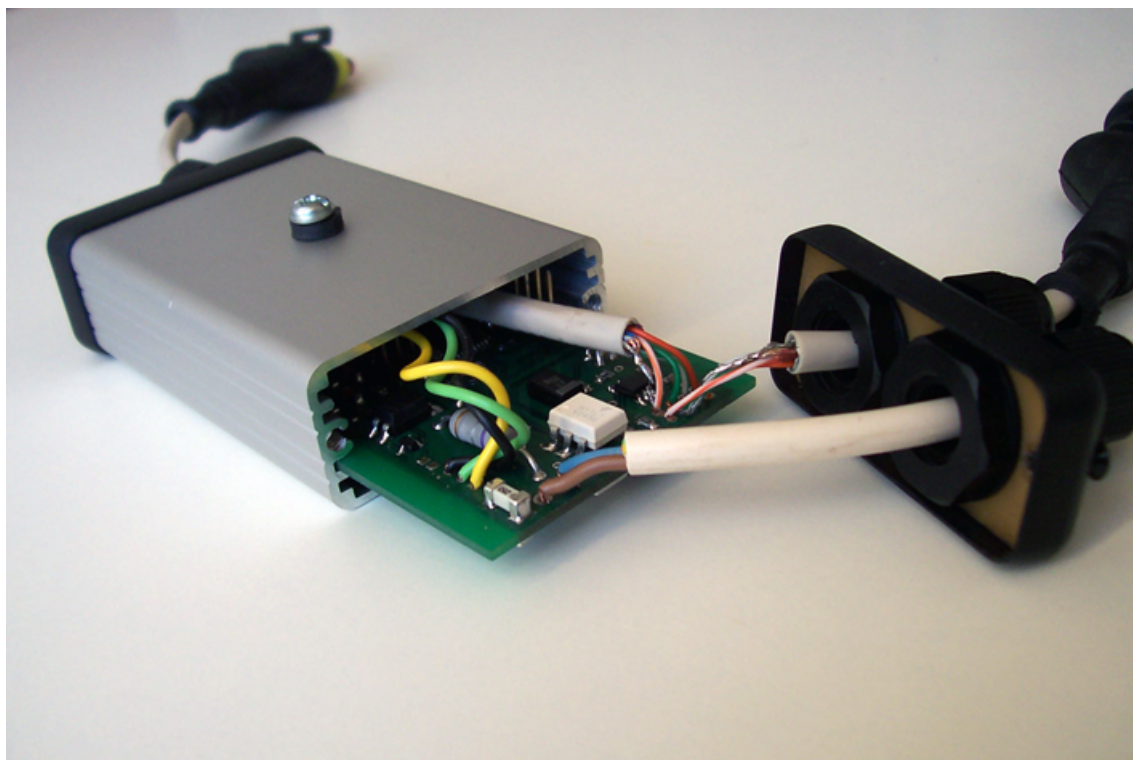
Elektrický obvod je realizován na oboustranné cuprexitové desce o rozměrech 50 x 69 mm. Z důvodu vyšší odolnosti vůči vibracím je deska z většiny osazena součástkami pro povrchovou montáž. Rozměr součástek byl zvolen na 0805, což ještě umožňuje ruční pájení bez větších komplikací. Sensory, indikační LED a další součástky umístěné mimo DPS nejsou k desce záměrně připojeny pomocí konektorů, ale jejich přívodní vodiče jsou zapájeny přímo v pokovených otvorech desky. Tím je předcházeno poruchám zapříčiněným uvolněním konektoru a tím ztracením potřebného kontaktu. Na desce je dobře viditelné galvanické oddělení obvodů pracující na potenciálu sběrnice. Nepoužité piny bran mikrokontroléru jsou vyvedeny a připraveny na případné využití při rozšiřování funkce měřicí jednotky. Analogový obvod je od číslicového oddělen a soustředěn do oblasti v blízkosti A/D převodníku.



**Obr. 6.1:** Okótovaný náčrtes konstrukčního boxu (v mm [inch]) |Převzato z [11]|

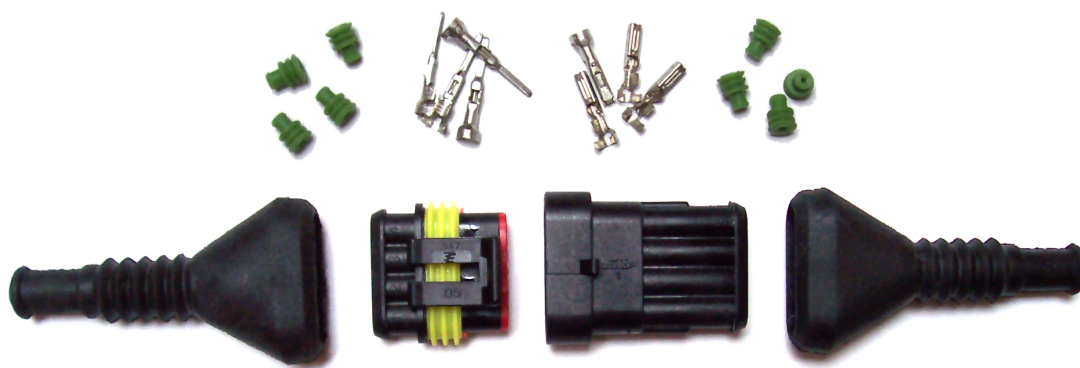
Deska je zasunuta do hliníkové krabičky s eloxovaným povrchem a plastovými čely z ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol). Náčrtes konstrukčního boxu s okótovanými rozměry je uveden na obr. 6.1. Mezi čely a hliníkovou částí krabičky jsou vložena těsnění zamezující vniku vody. Těsnění jsou zhotovena z těsnicí pryže označované jako paraguma. Tato pryž vyráběná z přírodního kaučuku vyniká svojí vysokou elasticitou, měkkostí a výbornými fyzikálně mechanickými vlastnostmi. Paraguma má teplotní odolnost od  $-40$  až do

+80 °C a částečně odolává i povětrnostním vlivům. Rozměry DPS jsou přizpůsobeny k zasunutí do ližin nacházejících se na vnitřní straně boků krabičky. Konstrukční box je přišroubován k plastovým podložkám šrouby se závitem M5. Tyto podložky jsou přilepeny ve čtvercových prolisech na povrchu baterie. Pod všemi šrouby vedoucími skrz krabičku jsou gumová těsnění. Veškeré kabely vedoucí z konstrukčního boxu ven jsou taženy skrz kabelové průchodky s krytím IP68 uchyceným v plastových čelech. Průchodky zamezují vniku vody a mechanicky ukotvují kabel ke konstrukci, což zabraňuje jeho nechtěnému vytržení z DPS. V čele krabičky jsou v neoprenových pouzdrech upevněny i signalizační LED. Konstrukční provedení jednotky nastiňuje fotografie na obr. 6.2. Sensor snímající teplotu baterie je z části zapaščen do pěnového polyetylenu přilepeného na spodní část krabičky. To sensor mechanicky přitlačuje k baterii a s tepelně vodivou pastou zajišťuje malý přechodový tepelný odpor mezi baterií a senzorem. Pěnový polyetylen se běžně používá k tepelné izolaci rozvodů teplé vody a odolává teplotám až 90 °C. Svými izolačními schopnostmi zmenšuje ovlivnění senzoru teploty baterie od sálající hliníkové části krabičky využití při balancování jako chladič. Balanční tranzistor je přišroubován na horní stěnu krabičky z vnitřní strany. Šroubem je připevněn také měděný proužek plechu, který zajišťuje připevnění senzoru pro měření teploty chladiče k povrchu krabičky. Oba teplotní senzory jsou připojeny k DPS stíněnými kabely používanými zejména pro mikrofonní techniku. Experimentálně bylo zjištěno, že použitá hliníková krabička je schopna uchladit výkonovou ztrátu na tranzistoru při průchodu balančního proudu o velikosti 0,5 A (připuštěné oteplení chladiče je 35°C).



**Obr. 6.2:** Fotografie měřicí jednotky s demontovaným čelem.

Při potřebě vyššího proudu tekoucího balančním tranzistorem musí být měřicí jednotka opatřena přídatným chladičem. Měřicí jednotky jsou mezi sebou a k BMS jednotce propojeny stíněným kabelem s kroucenými páry vodičů. Tento typ kabelu minimalizuje průnik rušení do přenášených signálů. Z jednotek je přes průchodky vyvedena dvojice těchto kabelů o délce přibližně 20 cm a jsou zakončeny konektory pro vzájemné spojení. Byly vybrány vodotěsné konektory se zámkem typu Superseal 1,5 využívané především v automobilovém průmyslu. Rozložený konektor se nachází na obr. 6.3. Tyto konektory vykazují krytí IP67 a jsou konstruovány s ohledem na splnění vysokých požadavků v oblasti spolehlivosti.



**Obr. 6.3:** Součásti konektoru Superseal (4 piny)

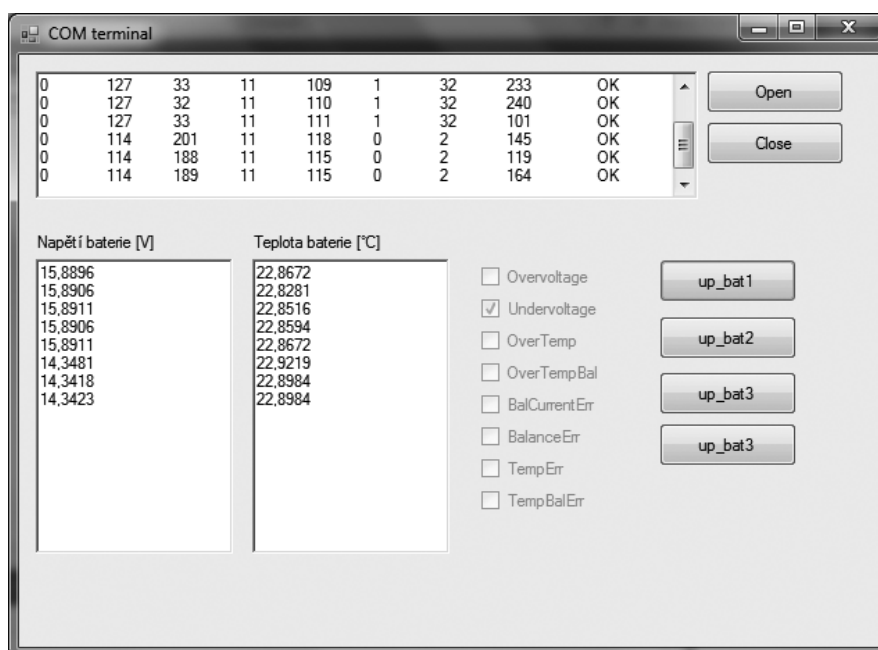
Kontakty jsou zhotoveny z fosforového bronzu a jejich maximální přechodový odpor je  $3 \text{ m}\Omega$ . Materiály použité ke konstrukci konektoru jsou chemicky odolné např. vůči motorové naftě, solím, motorovým olejům, brzdové kapalině a dalším agresivním látkám.

# 7

## Závěr

BMS je stále diskutovanější téma především z důvodu neustálého rozvoje technologií výroby moderních baterií. Tyto akumulátory jsou choulostivější na zacházení a při sériovém řazení vyžadují složitější řídicí systémy. Moderní akumulátory jsou pro své vlastnosti často využívány jako zdroje energie dopravních prostředků s elektrickým pohonem.

Zkonstruovaná měřicí jednotka svou funkcí odpovídá požadavkům. Univerzalita konstrukce umožňuje její použití i v jiných zařízeních. Ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2010 byla vytvořena aplikace pro snadné ověření funkce a pozdější diagnostiku systému. Pomocí USB/RS-485 převodníku lze touto aplikací jednoduše oslovovat jednotlivé měřicí jednotky nebo pouze sledovat provoz na sběrnici. Pro lepší orientaci jsou informace obsažené v příchozích paketech přepočteny přímo na hodnoty napětí či teploty a chybová hlášení jsou graficky znázorněna. Na obr. 7.1 je screenshot zmiňované aplikace.



Obr. 7.1: Screenshot aplikace umožňující snadnou diagnostiku měřících jednotek



Měřicí jednotka v klidovém stavu měří napětí se solidní přesností převyšující potřeby BMS. Při procesu balancování se chyba měření zvětší, i přesto je přesnost měření pro správnou funkci BMS dostačující. Chyba měření v celém rozsahu (10 až 17 V) nepřesáhne 0,7% měřené hodnoty. Značnou část chyby měření při balancování pravděpodobně způsobuje přírůstek úbytku napětí na pojistce F2 vytvořený proudem tekoucím přes optron U2 a úbytkem napětí na přívodních vodičích, kterými teče balanční proud. Problém by bylo možno řešit přivedením napětí na měřicí dělič ze svorek akumulátoru samostatnými vodiči jištěnými vlastní pojistkou. Při předpokladu, že jsou proudy způsobující přírůstek úbytku napětí na vodičích a pojistce konstantní, bylo by možné chybu eliminovat i softwarově. Jednotku by bylo nutné kalibrovat dvakrát. Jednou při zavřeném balančním tranzistoru a podruhé při otevřeném tranzistoru a průchodu balančního proudu. V programu by byly definovány dvě konstanty ofsetu, mezi kterými by se podle stavu jednotky volilo. Odstraňování této chyby na úkor vyšší složitosti obvodu nebo náročnější obsluhy není pro potřeby BMS nutné.

Bez přidaného chladiče je jednotka schopna balancovat při nabíjecím proudu 0,5 A. To může nepříjemně prodloužit proces balancování baterií. Proud tekoucí balančním obvodem lze pomocí hodnot odporů rezistorů R6 a R7 snadno měnit (podle rov. 2.1). Při důkladném chlazení hliníkové části konstrukčního boxu může balanční proud dosahovat hodnoty až 3 A. Maximální teplota jednotky by neměla při balancování přesáhnout teplotu 60 °C. Při konstrukci zařízení bylo dbáno na vodotěsnost. Měřicí jednotka by měla být schopna spolehlivého provozu i v deštivém počasí.

# Literatura

- [1] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. Plzeň: ZČU, 1998. ISBN 80-7082-411-5.
- [2] *Winston Battery* [online]. 2007 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://en.winston-battery.com>
- [3] *MGM COMPRO* [online]. Zlín: MGM COMPRO, ©2013 [cit. 10.5.2013]. Dostupné z: <http://www.mgm-compro.cz>
- [4] *Atmel* [online]. Atmel Corporation, ©2013 [cit. 8.5.2013]. Dostupné z: <http://www.atmel.com>
- [5] *Microchip* [online]. Microchip Technology, ©1998-2013 [cit. 8.5.2013]. Dostupné z: <http://www.microchip.com>
- [6] *Texas Instruments* [online]. Texas Instruments, ©1995-2013 [cit. 8.5.2013]. Dostupné z: <http://www.ti.com>
- [7] *Maxim Integrated* [online]. Maxim Integrated, ©2013 [cit. 22.5.2013]. Dostupné z: <http://www.maximintegrated.com>
- [8] MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR: [měření, řízení a regulace pomocí několika jednoduchých přípravků]*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 319 s. ISBN 80-730-0174-8.
- [9] HEROUT, Pavel. *Učebnice jazyka C*. 6. vyd. České Budějovice: Kopp, 2009, 271, viii s. ISBN 978-80-7232-383-8.
- [10] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 2005, 77 s. ISBN 80-010-3351-1.
- [11] *Hammond Manufacturing* [online]. Hammond Manufacturing, ©2013 [cit. 25.5.2013]. Dostupné z: <http://www.hammondmfg.com>
- [12] *Sensirion AG* [online]. Switzerland: Sensirion AG, 2009 [cit. 30.5.2013]. Dostupné z: <http://www.sensirion.com/>

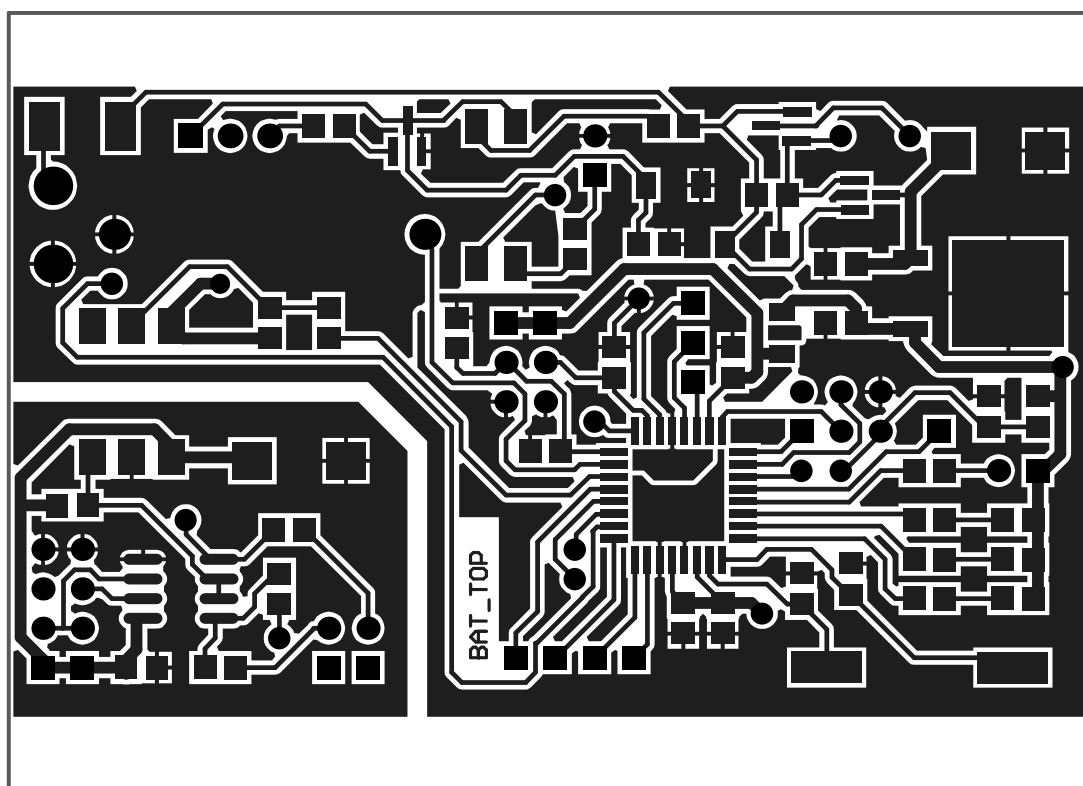
# **Příloha A**

## **Schéma zapojení**

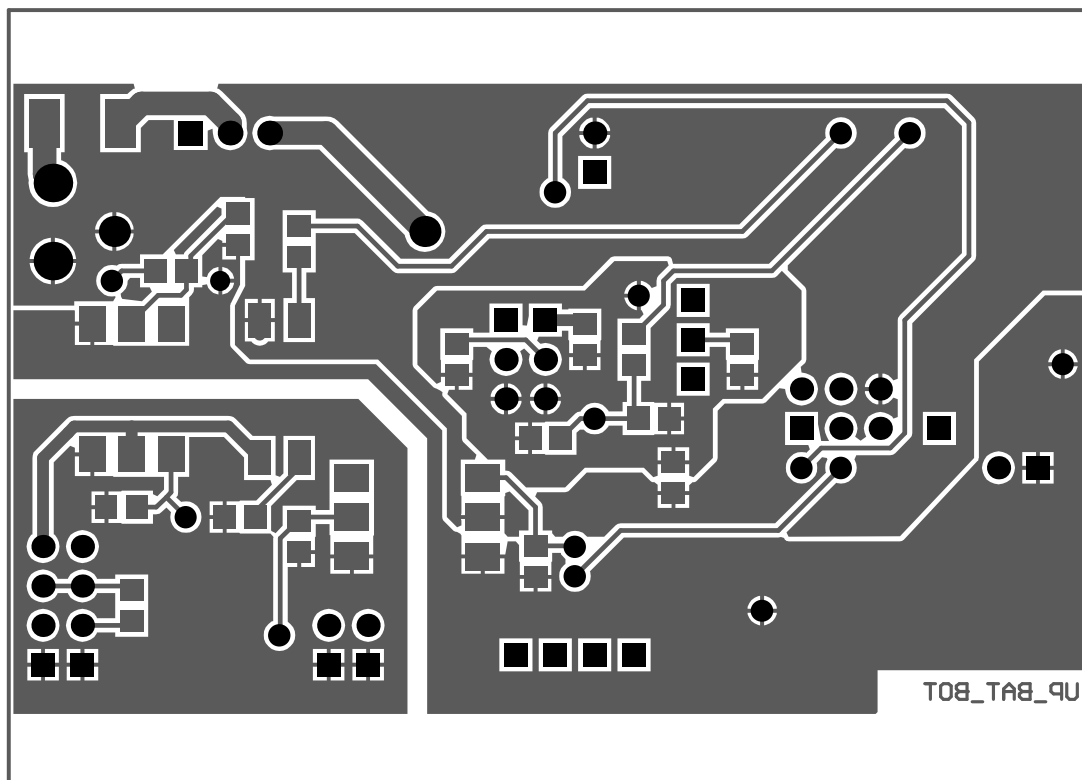


# Příloha B

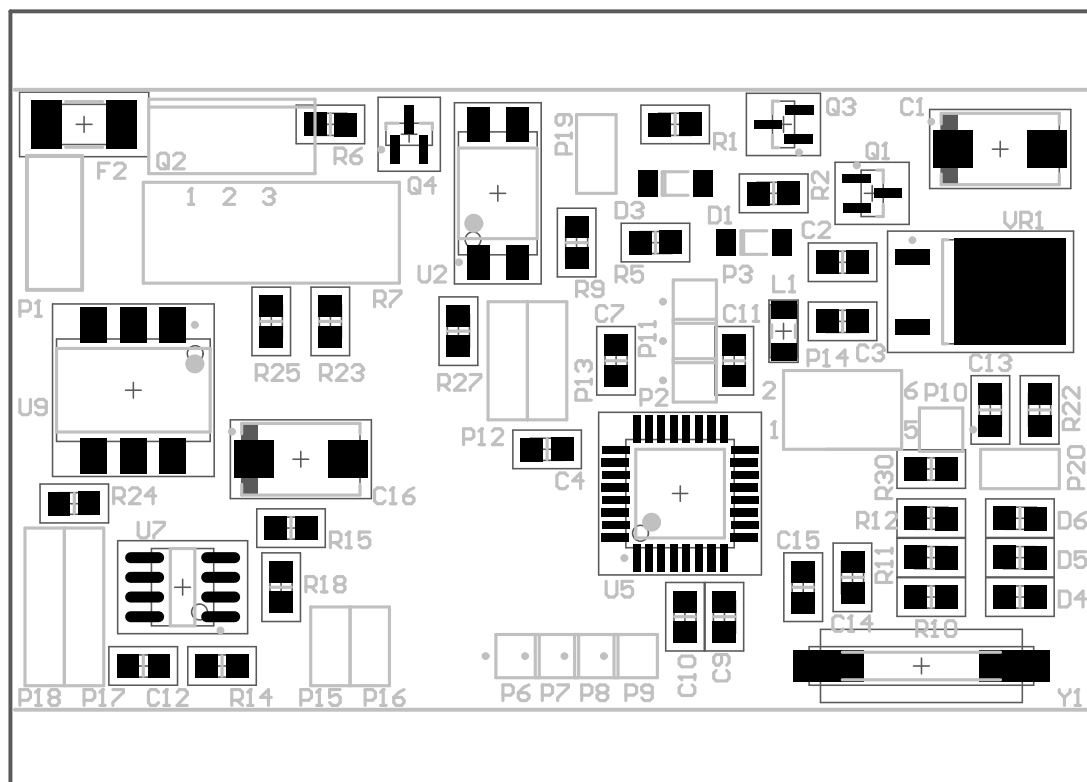
## Deska plošných spojů



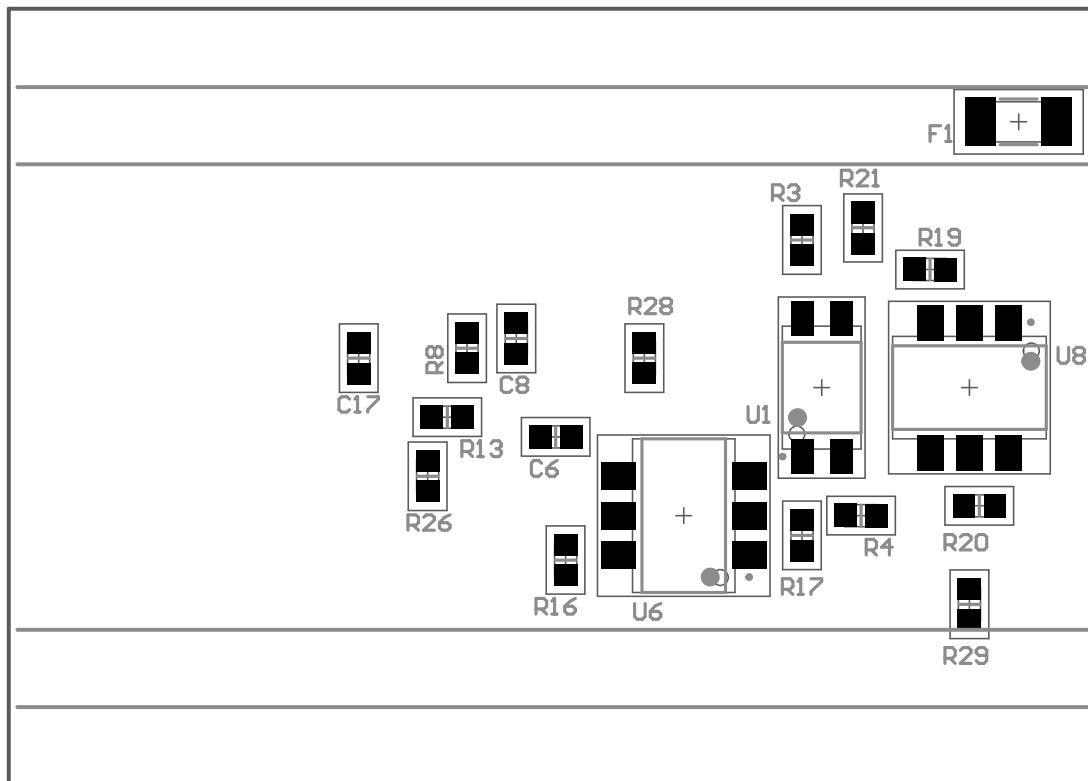
Obr. B.1: Vodivý motiv plošného spoje, měřítko 2 : 1 (strana TOP)



Obr. B.2: Vodivý motiv plošného spoje, měřítko 2 : 1 (strana BOTTOM)



Obr. B.3: Osazovací výkres strany TOP, měřítko 2 : 1



**Obr. B.4:** Osazovací výkres strany BOTTOM, měřítko 2 : 1

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	33 $\mu$ F / 25 V	SMD D size	Tantalový kondenzátor
C2, C3, C6, C8, C9	100 nF	0805	Keramický kondenzátor
C10, C11, C12, C13, C17	100 nF	0805	Keramický kondenzátor
C4, C7	470 pF	0805	Keramický kondenzátor
C14, C15	22 pF	0805	Keramický kondenzátor
C16	47 $\mu$ F / 10 V	SMD C size	Tantalový kondenzátor
D1, D3	10 V	MELF-D	Zenerova dioda
D4, D5, D6	10 V	0805	LED
F1	4 A	SMD	Pojistka (rychlá)
F2	250 mA	SMD	Pojistka (rychlá)
L1	10 $\mu$ H	0805	Tlumivka
Q1, Q3	IRLML6402	SOT23	MOSFET-P
Q2	IRF630	TO-220	MOSFET-N
Q4	BC817-40	SOT23	NPN
R1	1k5	0805	Rezistor
R2, R3, R13, R22	10k	0805	Rezistor
R4, R18, R19, R23	1k	0805	Rezistor
R5	10k	0805	Rezistor $\pm 0,1\%$
R6	5k6	0805	Rezistor
R8	75k	0805	Rezistor $\pm 0,1\%$
R9	82 R	0805	Rezistor
R10, R11, R12, R14, R15	150R	0805	Rezistor
R16, R17, R20	4k7	0805	Rezistor
R21, R24, R25	4k7	0805	Rezistor
R26	0R	0805	Rezistor
R7	R47	2 W	Rezistor
U1, U2	LTV817S	SO4	Optočlen
U5	ATmega8A-AU	TQFP	Mikrokontrolér
U6, U8, U9	H11L1	SO6	Optočlen
U7	SN65176BD	SOIC	Bus transceiver
VR1	78M05	DPAK	Stabilizátor
Y1	-	11,5 x 4,8 mm	Krystal

Tab. B.1: Seznam součástek



# Příloha C

## Zdrojový kód programu mikrokontroléru

### C.1 Hlavní část programu

```
1 /*
2  *LED_PWR   PB0
3  *LED4     PD5
4  *LED5     PD6
5  *LED6     PD7
6  *
7  *bat_temp PC0
8  *bat_volt PC1
9  *heat_temp PC2
10 *R7_volt  PC3
11 *
12 *bypass    PB2
13 *RS-485   PC4 0-->>RECIEVER
14 */
15
16 #include <avr/io.h>
17 #include <avr/interrupt.h>
18 #include "RS485.h"
19
20 #define ADR          ADR1
21 #define MAXVOLTAGE  16500 // [mV]
22 #define MINVOLTAGE  15500 // [mV]
23 #define MAXTEMP     26   // [°C]
24 #define MAXTEMPBAL  60   // [°C]
25 #define MINCURRENT  500  // [mA]
26 #define MAXCURRENT  3000 // [mA]
27 #define VOLTAGEDROP 300  // [mV] pokles napeti pri balancovani
28 #define MINUTES     1    // [min] cas behem ktereho napeti na baterii v poklesne o VOLTAGEDROP
29 #define OFFSET      247  // konstanta offsetu mereni napeti
30
31 #define VOLT_ARR_SIZE 64   // velikost pole (pocet prumerovanych vzorku)
32 #define TEMP_ARR_SIZE 32
33 #define CURR_ARR_SIZE 4
34
35 #define VOLT_ARR_LOG 6    // dvojkovy logaritmus z velikosti pole
36 #define TEMP_ARR_LOG 5
37 #define CURR_ARR_LOG 2
38
39 #define RESTORE_PERIOD 4   // perioda aktualizace error_byte, jedna perioda = 33 mericich cyklu
40
41 #define VoltageVal(x) (((x)/(8.5*1000))*400*VOLT_ARR_SIZE)+0.5 // vypocet hodnoty adc_suma z napeti
42 #define TempVal(x) (((x)*0.01)+0.5)*400*TEMP_ARR_SIZE)+0.5
43 #define CurrentVal(x) (((x)/1000)*0.47*400*CURR_ARR_SIZE)+0.5
44
45 // FLAGS DEFINE
```

```

46 #define TRANS_READY    0
47 #define PACKET_READY  1
48 #define NEW_REQUEST    2
49
50 #define CITAC 0xE0
51
52
53 volatile unsigned char receive_data[REQ_BYTES];
54 volatile unsigned char data[RES_BYTES];
55 unsigned char status_bat = 0;
56 unsigned char err_bat = 0;
57 volatile unsigned char flag=0;
58
59 volatile unsigned int adc_suma[4];
60 volatile unsigned int adc_suma_corr[4];
61 volatile unsigned int adc_data_battemp[TEMP_ARR_SIZE];
62 volatile unsigned int adc_data_volt[VOLT_ARR_SIZE];
63 volatile unsigned int adc_data_heatemp[TEMP_ARR_SIZE];
64 volatile unsigned int adc_data_curr[CURR_ARR_SIZE];
65 volatile unsigned int *array_poin[] = {adc_data_battemp, adc_data_volt,
66   adc_data_heatemp, adc_data_curr};
67 volatile unsigned char data_poin[4];
68 volatile unsigned char data_poin_mask[] = {0xff>>(8-TEMP_ARR_LOG), 0xff>>(8-VOLT_ARR_LOG),
69   0xff>>(8-TEMP_ARR_LOG), 0xff>>(8-CURR_ARR_LOG)};
70 volatile int correction[] = {OFFSET/(VOLT_ARR_SIZE/TEMP_ARR_SIZE), OFFSET,
71   OFFSET/(VOLT_ARR_SIZE/TEMP_ARR_SIZE), OFFSET/(VOLT_ARR_SIZE/CURR_ARR_SIZE)};
72 volatile unsigned char period = 0;
73
74 void Setup(void)
75 {
76     //PORT
77     DDRB|=(1<<DDRBO)|(1<<DDR2); //led_pwr, bypass
78     DDRC|=(1<<DDRC4); //driver
79
80     DDRD|=(1<<DDR5)|(1<<DDR6)|(1<<DDR7); //leds
81     PORTD|=(1<<PORT5)|(1<<PORT6)|(1<<PORT7);
82
83     //TO
84     TIMSK|=(1<<TOIE0);
85     TCNT0 = CITAC;
86
87     //ADC
88     ADMUX|=(1<<REFS1)|(1<<REFS0); //ref napeti 2.56
89     V<~>ADCSRA|=(1<<ADEN)|(1<<ADIF)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0); //prescaler 8
90
91     //USART
92     UCSRA|=(1<<MPCM)|(1<<U2X); //multi-processor com, dvajnasobna rychlost
93     UCSRB|=(0<<TXCIE)|(1<<TXEN)|(0<<RXCIE)|(1<<RXEN);
94     UCSRC|=(1<<URSEL)|(1<<UCSZ2)|(1<<UCSZ1)|(1<<UCSZ0); //9-bit
95     UBRRL=12; //9600 Bd
96
97     //T1
98     TCCR1B|=(1<<WGM12)|(1<<CS12)|(1<<CS10); //predelicka 1024, compare mod
99     OCR1A=58594; //1 minuta
100
101
102     //SLEEP
103     MCUCR|=(1<<SE); //ADC NOISE REDUCTION - idle mod, sleep enable
104
105     //WDT
106     __asm volatile ("WDR"); //Watchdog reset
107     WDTCSR|=(1<<WDE)|(1<<WDP2); //Watchdog Enable,Time-out 0.26s
108 }
109
110 void TransByte (void)
111 {
112     static unsigned char numb=0;
113
114     if(numb < RES_BYTES){
115         if(!( UCSRA & (1<<UDRE))) //pokud nebude buffer prazdny
116             return;
117
118         if(numb==0) //nastavovani 9. bitu

```

```

119         UCSRB|=(1<<TXB8);
120     else
121         UCSRB&=~(1<<TXB8);
122
123     UDR=data[numb];
124     numb++;
125 }
126 else{
127     numb=0;
128     TCCR0|=(1<<CS02);           //timer0 ON, prepnutí driveru
129     flag=0x80;                 //vynulování příznaku, zamezení převodu
130 }
131 }
132
133 void CreateData(void)
134 {
135     unsigned char *pointer;
136     unsigned long x;
137     int temp;
138     pointer = (unsigned char *) &x;
139
140     for(unsigned char i = 0; i<4; i++){
141         adc_suma_corr[i] = adc_suma[i]+correction[i];
142     }
143
144     x=(unsigned long)adc_suma_corr[1] * 44564;           //prepočet do for. Q=4.11 (1/400 * 8.5 *2^21)
145     if (*(pointer +1) & 0x80)                          //zaokrouhlení
146         x+=0x10000;
147
148     data[1]**(pointer + 3);
149     data[2]**(pointer + 2);
150
151     temp = adc_suma_corr[0] - 6400;                   //odčtení 0.5 V, rovnou ve formátu Q=8.7
152     pointer = (unsigned char *) &temp;
153
154     data[0]=ADRMAS;
155     data[3]**(pointer + 1);
156     data[4]**(pointer + 0);
157     data[5]=status_bat;
158     data[6]=err_bat;
159     data[RES_BYTES-1] = CheckCrc(data, RES_BYTES-1); //výpočet a přidání CRC
160
161     flag&=~(1<<NEW_REQUEST);
162     flag|=(1<<PACKET_READY);
163 }
164
165 void CreateErrorByte (void)
166 {
167     static unsigned char j=0;
168     static unsigned char first=0;
169     static unsigned int voltage;
170
171     for(unsigned char i = 0; i<4; i++){
172         adc_suma_corr[i] = adc_suma[i]+correction[i];
173     }
174
175     if (adc_suma_corr[0]>TempVal(MAXTEMP))
176         {err_bat|=(1<<OVERTEMP);}
177     else
178         {err_bat&=~(1<<OVERTEMP);}
179
180     if (adc_suma_corr[2]>TempVal(MAXTEMPBAL))
181         {err_bat|=(1<<OVERTEMPBAL);}
182     else
183         {err_bat&=~(1<<OVERTEMPBAL);}
184
185     if(adc_suma_corr[1]>VoltageVal(MAXVOLTAGE))
186         {err_bat|=(1<<OVERVOLTAGE);}
187     else
188         {err_bat&=~(1<<OVERVOLTAGE);}
189
190     if(adc_suma_corr[1]<VoltageVal(MINVOLTAGE))
191         {err_bat|=(1<<UNDERVOLTAGE);}

```

```

192     else
193         {err_bat&=~(1<<UNDERVOLTAGE);}
194
195     if(((adc_suma_corr[3]<CurrentVal(MINCURRENT))||(adc_suma_corr[3]>CurrentVal(MAXCURRENT)))
196         &&(status_bat&(1<<BALREQUEST)))
197         {err_bat|=(1<<BALCURRENTERR);}
198     else
199         {err_bat&=~(1<<BALCURRENTERR);}
200
201     if((adc_suma_corr[0]<TempVal(-40))||(adc_suma_corr[0]>TempVal(125)))
202         {err_bat|=(1<<TEMPERR);}
203     else
204         {err_bat&=~(1<<TEMPERR);}
205
206     if((adc_suma_corr[2]<TempVal(-40))||(adc_suma_corr[2]>TempVal(125)))
207         {err_bat|=(1<<TEMPBALERR);}
208     else
209         {err_bat&=~(1<<TEMPBALERR);}
210
211
212     if((err_bat&(1<<OVERVOLTAGE))&&!((err_bat&(1<<OVERTEMPBAL))&&(receive_data[1]&(1<<CHARGE))) {
213         PORTB|=(1<<PORTB2);
214         status_bat|=(1<<BALREQUEST);
215     }
216
217     if ((status_bat&(1<<BALREQUEST))&&(first == 0)){
218         j=0;
219         TCNT1 = 0;
220         first = 1;
221         voltage = adc_suma_corr[1];
222     }
223
224     if((err_bat&(1<<UNDERVOLTAGE))||(err_bat&(1<<OVERTEMPBAL))) {
225         PORTB&=~(1<<PORTB2);
226         status_bat&=~(1<<BALREQUEST);
227         err_bat&=~(1<<BALANCEERR);
228         first = 0;
229     }
230
231
232     if(TIFR & (1<<OCF1A)){           //test priznaku Timer1
233         j++;
234         TIFR|=(1<<OCF1A);
235     }
236
237     if ((status_bat&(1<<BALREQUEST))&&(j>=MINUTES)){
238         j=0;
239         first = 0;
240         if(voltage>adc_suma_corr[1]){
241             if((voltage - adc_suma_corr[1]<VoltageVal(VOLTAGEDROP))
242                 err_bat|=(1<<BALANCEERR);
243             else
244                 err_bat&=~(1<<BALANCEERR);
245         }
246         else
247             err_bat|=(1<<BALANCEERR);
248     }
249 }
250
251 void NewData(void)
252 {
253     static unsigned char numb=0;
254     unsigned char crc;
255     unsigned char byte;
256     unsigned char bit8;
257
258     bit8 = UCSRB;
259     byte = UDR;
260
261     if(bit8 & (1<<RXB8)){           //adresa
262         numb=0;
263         if ((byte == ADR)){
264             receive_data[numb]=byte;

```

```

265         numb++;
266         UCSRA&=~(1<<MPCM); //OFF Multi-processor Com. Mode
267     }
268 }
269 else{
270     receive_data[numb]=byte;
271     numb++;
272     if (numb>=(REQ_BYTES)){ //vse prijato
273         UCSRA|=(1<<MPCM); //ON Multi-processor Com. Mode
274         crc= CheckCrc(receive_data, REQ_BYTES-1); //generovani CRC
275
276         if(crc==receive_data[REQ_BYTES-1]){ //kontrola CRC
277             TCCR0|=(1<<CS02); //TIMER ON ==> prepnuti driveru
278             flag|=(1<<NEW_REQUEST);
279         }
280     }
281 }
282 }
283
284
285 //*****INTERRUPT*****
286 ISR(TIMER0_OVF_vect)
287 {
288     TCNT0 = CITAC;
289     TCCR0&=~(1<<CS02);
290     PORTC^=(1<<PORTC4); // DRIVER SWITCH
291
292     if((PORTC&(1<<PORTC4)))
293         flag|=(1<<TRANS_READY);
294     else
295         flag=0;
296 }
297
298 ISR(ADC_vect)
299 {
300     static char mux=0;
301     static unsigned char pin=0;
302     static unsigned int adc_result;
303     static unsigned char pointer;
304
305     adc_result=ADC;
306
307     pointer = data_poin[pin] & data_poin_mask[pin]; //odmaskovani pointeru polozky pole
308     adc_suma[pin]= adc_suma[pin] - *(array_poin[pin] + pointer) + adc_result;
309     *(array_poin[pin] + pointer) = adc_result; //prepsani nejstarsiho prvku pole novym
310     data_poin[pin]++;
311
312     mux++;
313
314     if(mux==33){
315         mux=-1;
316         pin=3;
317         period++;
318     }
319     else{
320         if(mux & 0x01)
321             pin=1;
322         else if(!(mux & 0x03))
323             pin=0;
324         else
325             pin=2;
326     }
327
328     ADMUX&=~((1<<MUX3)|(1<<MUX2)|(1<<MUX1)|(1<<MUX0));
329     ADMUX|=((1<<MUX3)|(1<<MUX2)|(1<<MUX1)|(1<<MUX0))&pin;
330 }
331
332
333 int main(void)
334 {
335     Setup();
336     sei();
337

```

```

338     while(1)
339     {
340         if (UCSRA & (1<<RXC)) //testovani noveho bytu v~receive bufferu
341             NewData();
342
343         switch (flag){
344             case 0:
345                 if (period > (RESTORE_PERIOD-1)){ //aktualizace error_byte
346                     CreateErrorByte();
347                     period = 0;
348                 }
349                 __asm volatile ("sleep"); break; //uspani, automaticke zapnuti ADC
350             case (1<<NEW_REQUEST): CreateData(); break;
351             case ((1<<TRANS_READY)|(1<<PACKET_READY)):
352                 if(UCSRA & (1<<UDRE)) //pokud je buffer prazdny
353                     TransByte();
354                 break;
355         }
356         __asm volatile ("WDR"); //Watchdog reset
357     }
358 }

```

## C.2 Soubor RS485.h

```

1 #ifndef RS485_H_
2 #define RS485_H_
3
4 #define POLYNOMIAL    0x131 //P(x)=x^8+x^5+x^4+1 = 100110001
5 #define ADMAS        0x00 //master address
6 #define ADR1         0x11
7 #define ADR2         0x22
8 #define ADR3         0x44
9 #define ADR4         0x88
10 #define RES_BYTES    8 //pocet bytu odpovedi
11 #define REQ_BYTES    3 //pocet bytu pozadavku
12
13 // DEFINE STATUS_BMS BITS
14 #define BALANCING    0
15 #define CHARGE      1
16
17 // DEFINE ERR_BAT BITS
18 #define OVERVOLTAGE  0
19 #define UNDERVOLTAGE 1
20 #define OVERTEMP     2
21 #define OVERTEMPBAL  3
22 #define BALCURRENTERR 4
23 #define BALANCEERR   5
24 #define TEMPERR      6
25 #define TEMPBALERR   7
26
27 // DEFINE STATUS_BAT BITS
28 #define BALREQUEST   0
29
30 unsigned char CheckCrc (unsigned char data[], unsigned char nbrOfBytes);
31
32 #endif
33

```

## C.3 Soubor RS485.c

```

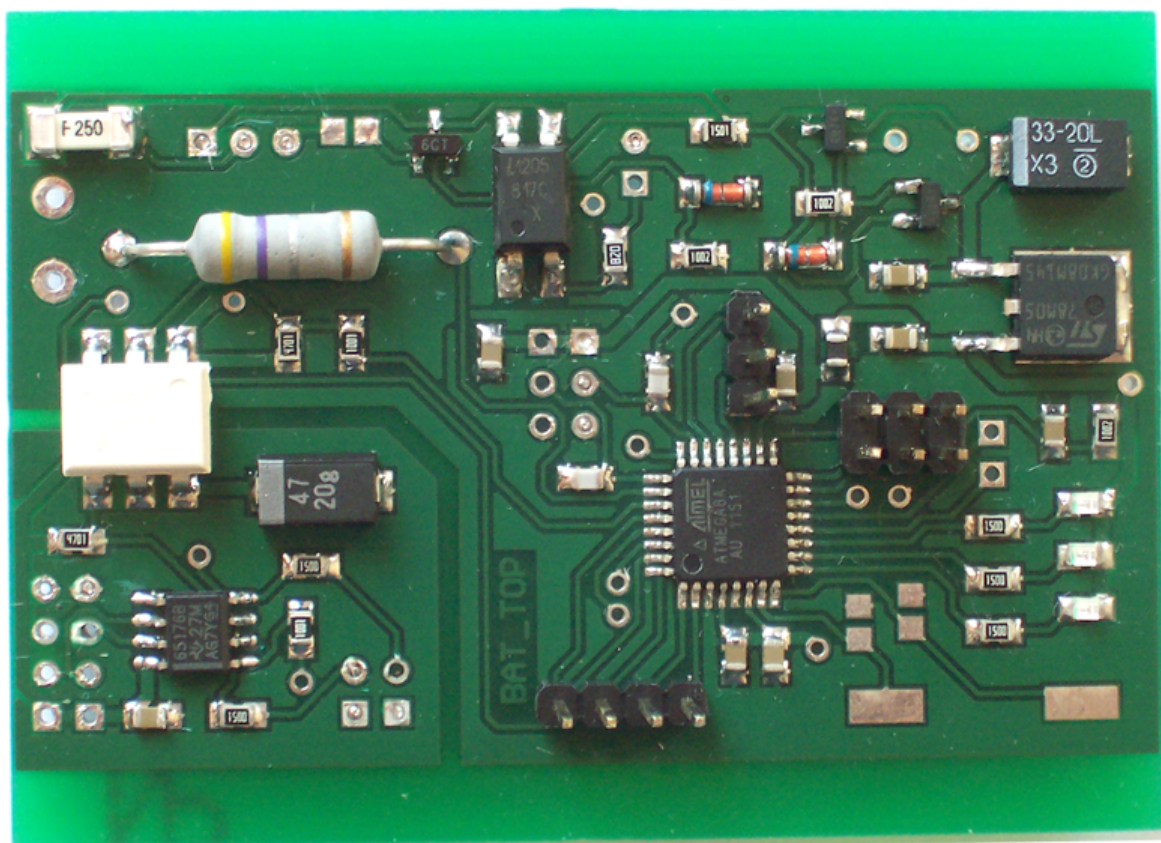
1 #include "RS485.h"
2
3 unsigned char CheckCrc (unsigned char data[], unsigned char nbrOfBytes)
4 {
5 //*****
6 //calculates checksum for n bytes of data
7 //input: data[] checksum is built based on this data

```

```
8 //      nbrOfBytes checksum is built for n bytes of data
9 //return:  checksum
10 //*****
11     unsigned char crc = 0;
12     unsigned char byteCtr;
13
14     //calculates 8-Bit checksum with given polynomial
15     for (byteCtr = 0; byteCtr < nbrOfBytes; ++byteCtr)
16     { crc ^= (data[byteCtr]);
17       for (unsigned char bit = 8; bit > 0; --bit)
18       { if (crc & 0x80) crc = (crc << 1) ^ POLYNOMIAL;
19         else crc = (crc << 1);
20       }
21     }
22     return crc;
23 }
```

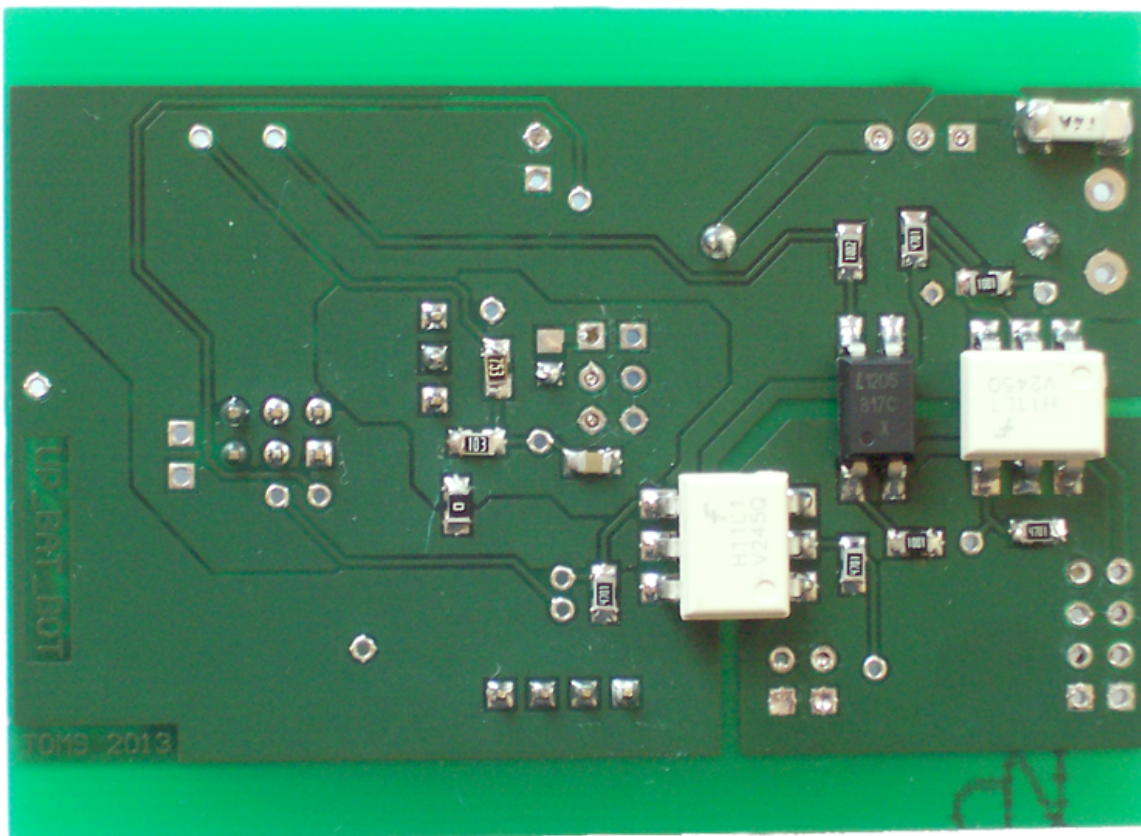
## Příloha D

### Fotografie konstruované měřicí jednotky

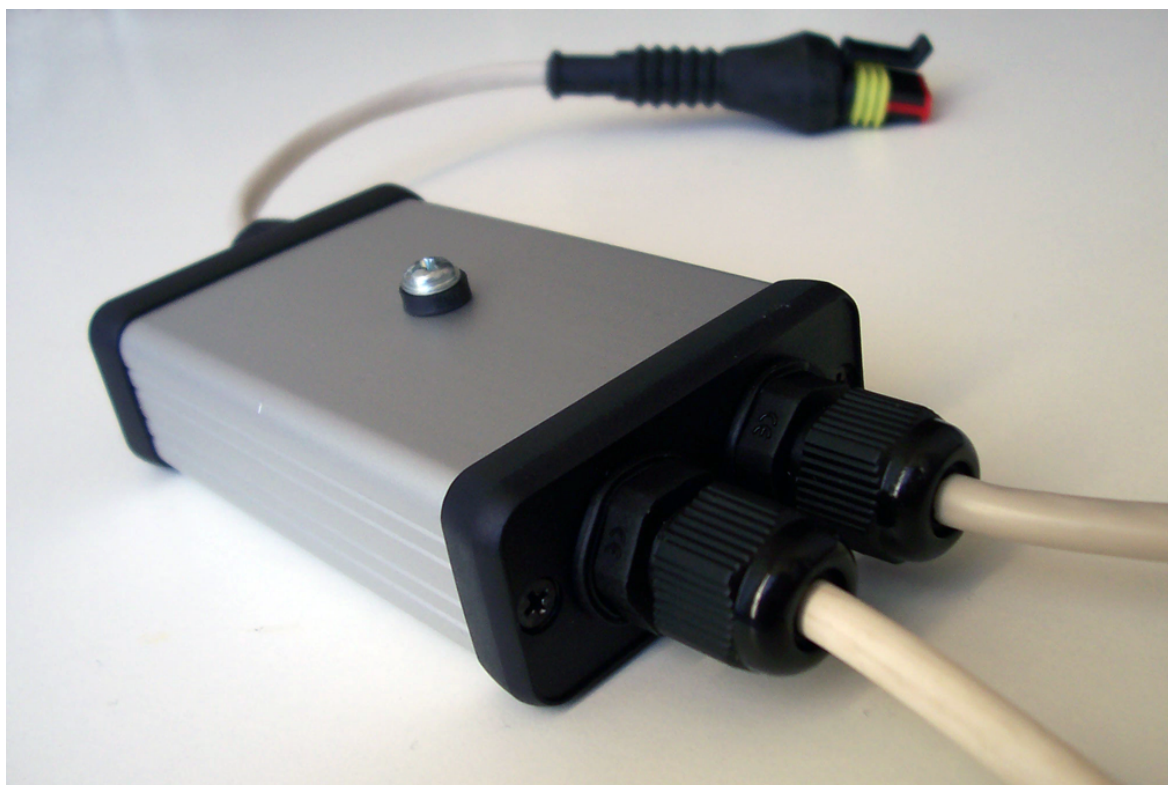


Obr. D.1: Osazená DPS bez připájených přívodních vodičů součástek umístěných mimo desku  
- strana TOP





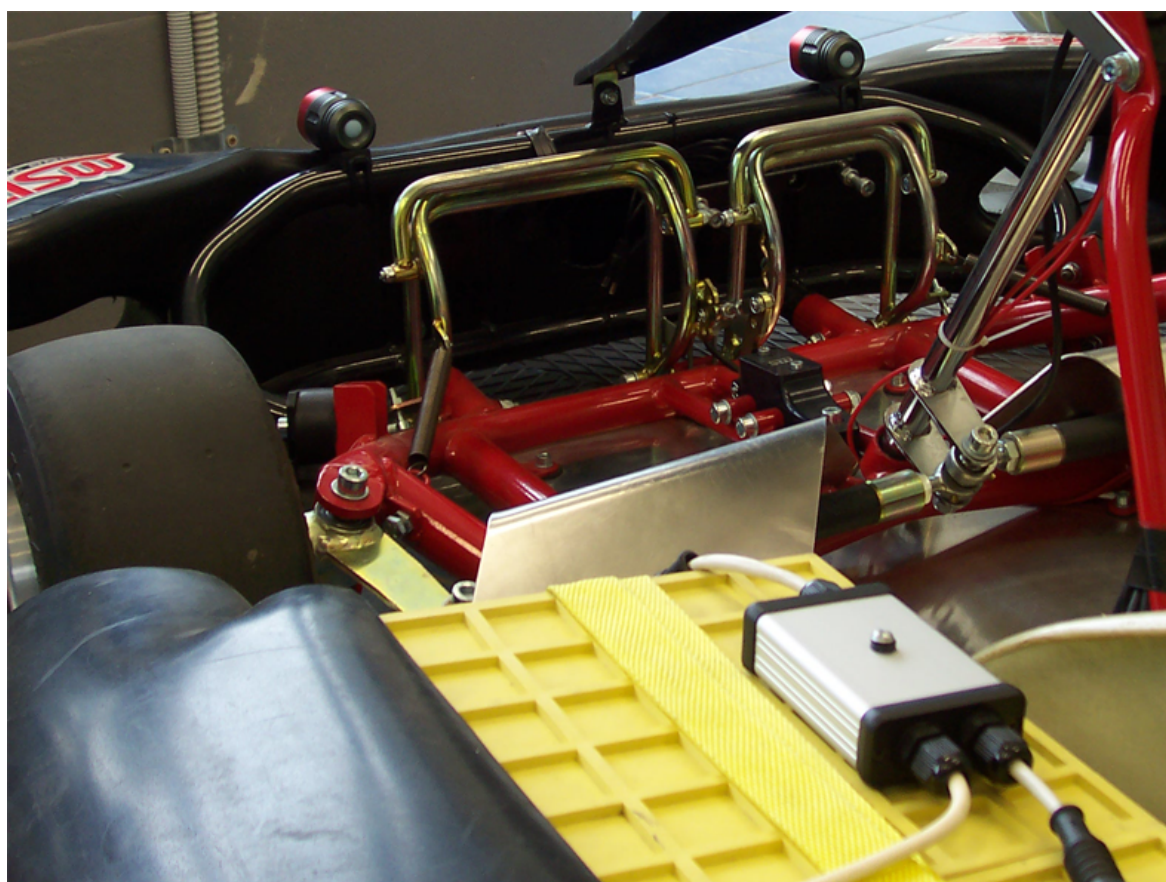
**Obr. D.2:** Osazená DPS bez připájených přívodních vodičů součástek umístěných mimo desku  
- strana BOTTOM



**Obr. D.3:** Sestavená měřicí jednotka



Obr. D.4: Sestavená měřicí jednotka, indikační LED



Obr. D.5: Měřicí jednotka umístěna na LiFeYPO<sub>4</sub> baterii elektromotokáry