

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**System řízení baterie s komunikací po silových vodičích.**

**vedoucí práce: Ing. Luboš Streit  
autor: Bc. Jaroslav Tolar**

**2014**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2013/2014

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

Jméno a příjmení: **Bc. Jaroslav TOLAR**  
Osobní číslo: **E12N0071P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**  
Název tématu: **Systém řízení baterie s komunikací po silových vodičích**  
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

Návrh a realizace systému řízení baterie (BMS) bez nutnosti použití komunikačních vodičů.

1. Stručně popište druhy Li-ion baterií a funkci ochranných obvodů.
2. Navrhněte obvodové schéma.
3. Navrhněte desku plošných spojů.
4. Realizujte funkční vzorek a implementujte řídicí program.
5. Experimentálně ověřte funkci.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí diplomové práce: Ing. Luboš Streit  
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2013  
Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2014

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na způsoby ochrany Li-ion baterií, popisuje důležité parametry, které je potřeba sledovat během jejich nabíjení a provozování. První kapitola charakterizuje vlastnosti Li-ion baterií a porovnává je nejen s ostatními, běžně dostupnými elektrochemickými články, ale také s různými druhy článků Li-ion. Druhá kapitola se zaměřuje na význam činnosti systému řízení baterie, popisuje jeho funkci a základní principy. Ve třetí kapitole práce jsou popsány funkce a vlastnosti důležitých komponentů navrhovaného obvodu řízení baterie a postup při návrhu desky plošných spojů. Následuje kapitola, která se zabývá ověřením funkčnosti zapojení a implementovaného řídicího programu.

## **Klíčová slova**

Systém řízení baterie, lithium-iontové baterie, komunikace prostřednictvím silových vodičů, LTC6802, SIG60

## **Abstract**

The submitted thesis deals with the method of protection of Li-ion battery. The author has also described all important parameters related to its charging and operation. The first part describes the characteristics of Li-ion batteries and compares them not only with the characteristics of other commonly available electrochemical cells but also with different types of Li-ion. The following part is focused on the importance of battery management system and also describes its basic principles and function. The third section contains a description of the functions and features of important components of the battery management circuit design as well as the printed circuit board process design. The next chapter deals with the verification of the wiring together with the control program.

## **Key words**

Battery management system, lithium-ion battery, power line communication, LTC6802, SIG60

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 11.5.2014

Jaroslav Tolar

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Lubošovi Streitovi za cenné profesionální rady, trpělivost, připomínky a metodické vedení práce. Dále všem, kteří mě podporovali jak během studia, tak během zpracovávání této práce. Zvláště pak zaměstnancům KEV a RICE.

# Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1 LI-ION BATERIE .....</b>	<b>12</b>
1.1 VÝHODY A NEVÝHODY LI-ION BATERÍ.....	12
1.1.1 Výhody .....	13
1.1.2 Nevýhody.....	14
1.2 PARAMETRY POPISUJÍCÍ PROVOZNÍ STAVY BATERÍ.....	16
1.2.1 SOC, DOD .....	16
1.2.2 SOH.....	16
1.2.3 C-rate .....	16
1.3 DRUHY LITHIUM-IONTOVÝCH BATERÍ .....	17
1.3.1 Lithium Cobalt Oxide(LiCoO <sub>2</sub> ).....	17
1.3.2 Lithium Manganese Oxide (LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ).....	18
1.3.3 Lithium Iron Phosphate (LiFePO <sub>4</sub> ).....	19
1.3.4 Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (LiNiMnCoO <sub>2</sub> ).....	19
1.3.5 Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (LiNiCoAlO <sub>2</sub> ) .....	20
1.3.6 Lithium Titanate (Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub> ) .....	20
1.3.7 Shrnutí.....	20
1.4 NABÍJENÍ .....	23
<b>2 SYSTÉM ŘÍZENÍ BATERIE (BMS).....</b>	<b>25</b>
2.1 ÚKOLY BMS .....	26
2.2 DRUHY METOD BALANCOVÁNÍ .....	27
2.2.1 Pasivní balancování.....	27
2.2.2 Aktivní balancování .....	28
<b>3 NÁVRH DESKY PLOŠNÉHO SPOJE.....</b>	<b>30</b>
3.1 ZÁKLADNÍ ČÁSTI NÁVRHU .....	30
3.2 ALTIUM DESIGNER .....	32
3.3 LTC6802.....	33
3.3.1 Popis činnosti LTC 6802.....	34
3.3.2 Režimy provozu .....	38
3.3.3 Sériový port.....	40
3.4 SIG60.....	43
3.4.1 Přehled.....	45
3.4.2 Činnost.....	47
3.5 LM5008A.....	49
3.6 MSP-EXP430G2.....	51
<b>4 IMPLEMENTACE PROGRAMU A OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI .....</b>	<b>53</b>
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>56</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>58</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>59</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>60</b>



<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>
PŘÍLOHA Č.1 - SEZNAM SOUČÁSTEK .....	1
PŘÍLOHA Č. 2 - KOMPLETNÍ SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	3
PŘÍLOHA Č. 3 - HORNÍ VRSTVA SPOJŮ BEZ POLYNOMU.....	4
PŘÍLOHA Č. 4 - HORNÍ VRSTVA SPOJŮ S POLYNOMEM .....	5
PŘÍLOHA Č. 5 - SPODNÍ VRSTVA SPOJŮ BEZ POLYNOMU .....	6
PŘÍLOHA Č. 6 - SPODNÍ VRSTVA SPOJŮ S POLYNOMEM.....	7
PŘÍLOHA Č. 7 – OSAZENÁ DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ S OBVODEM SIG60.....	8
PŘÍLOHA Č. 8 – OSAZENÁ DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ S OBVODY LTC6802.....	8
PŘÍLOHA Č. 9 – KOMPLETNÍ ZAPOJENÍ PRO KOMUNIKACI PROSTŘEDNICTVÍM SILOVÝCH VODIČŮ .....	9

## Seznam symbolů a zkratek

<i>A/D</i>	- analogový/digitální
<i>BMS</i>	- Battery Management System – systém řízení baterie
<i>C</i>	- C-rate – koeficient proudové zatížitelnosti
<i>CAN</i>	- Controller Area Network
<i>CDC</i>	- Comparator Duty Cycle – střída komparátoru
<i>DOD</i>	- Depth Of Discharge - hloubka vybití
<i>LCO</i>	- článek Lithium Cobalt Oxide
<i>LFP</i>	- článek Lithium Phosphate
<i>Li-ion</i>	- Lithium-iontový akumulátor
<i>LIN</i>	- Local Interconnect Network – protokol sériové komunikace
<i>LMO</i>	- článek Lithium Manganese Oxide
<i>LTO</i>	- článek Lithium Titanate
<i>NCA</i>	- článek Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide
<i>NiCd</i>	- Nikl-kadmiový akumulátor
<i>NiMH</i>	- Nikl-metal hydridový akumulátor
<i>NMC</i>	- článek Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide
<i>OV</i>	- overvoltage – přepětí
<i>SOC</i>	- State Of Charge – úroveň nabití
<i>SOH</i>	- State Of Health – úroveň zdraví baterie
<i>SPI</i>	- Serial Peripheral Interface - sériové periferní rozhraní
<i>UART</i>	- Universal Asynchronous Receive/Transit- univerzální asynchronní
<i>UV</i>	- undervoltage – podpětí
<i>VOV</i>	- Overvoltage Comparison Voltage – nastavená komparační úroveň přepětí
<i>VUV</i>	- Undervoltage Comparison Voltage – nastavená komparační úroveň podpětí

## Úvod

Od okamžiku objevení prvního elektrochemického článku překonala tato technologie velice dlouhou cestu. Ke snaze, co nejvíce zdokonalit tuto technologii skladování elektrické energie, přispívá v posledních letech rozvoj hybridních a elektrických dopravních prostředků. Ty využívají jako zdroj síly potřebné ke svému pohybu kombinaci spalovacího a elektrického motoru, nebo pouze pohon elektrický. Elektrický pohon má oproti spalovacímu mnoho výhod. Nejdůležitějšími z nich jsou vysoká účinnost, plný moment od nulových otáček, nízká hlučnost a vysoká spolehlivost. Největší překážkou k jejich masovému nasazení do běžného provozu je právě problematika skladování elektrické energie.

Díky pokroku techniky dochází k vývoji baterií, které díky novým technologiím a moderním materiálům umožňují skladování elektrické energie ve stále větší energetické hustotě. Vysoký měrný výkon a kapacita moderních baterií jsou předpokladem pro jejich využití ve vozidlech s elektrickým pohonem. V současné době je nejvyšších hodnot energetické hustoty dosahováno u lithium-iontových baterií. Tato skutečnost vede ke snaze využívat Li-ion baterie jak ve spotřební elektronice, u které je vyžadováno napájení z nezávislého zdroje, tak ve slibně se rozvíjejícím odvětví elektrických automobilů.

Tyto poměrně mladé technologie s sebou nesou komplikace, které je potřeba řešit tak, aby bylo zajištěno bezpečné provozování baterií a nedocházelo ke zkrácení jejich životnosti, či poškození. Těmito problémy se zabývají systémy řízení baterie, známé pod zkratkou BMS, která je odvozena od anglického „battery management system“. Tyto systémy mají za úkol zajistit právě bezpečné provozování baterie jak během doby, kdy je energie v ní využívána k napájení externího zařízení, tak během jejího nabíjení.

Komunikace systému řízení baterie s nadřazeným modulem je zpravidla realizována prostřednictvím sériové komunikace. Toto řešení vyžaduje kromě vodičů určených pro nabíjení a provozování baterie přivedení dalších vodičů pro komunikaci. Jestliže by bylo možné komunikaci realizovat prostřednictvím silových vodičů (powerline communication), mohlo by dojít k odstranění těchto speciálních vodičů určených pro komunikaci, což by vedlo k materiálovým, prostorovým i hmotnostním úsporám.

# 1 Li-Ion baterie

V současné době dochází k nahrazování olovených a NiMH baterií, které byly hojně používány, jako trakční baterie, bateriemi Li-ion. Tento druh baterií je díky vysoké kapacitě velice vhodný, na druhou stranu je velmi citlivý právě na přebíjení či příliš hlubokému vybíjení. Z tohoto důvodu vyžadují vhodný řídicí systém, který kontroluje jejich stav v jakékoliv fázi provozu. [1]

První pokusy s lithiovými bateriemi začaly již v roce 1912. První komerčně vyráběná lithiová baterie byla na trh uvedena v 70. letech minulého století. Tuto první baterii ovšem ještě nebylo možné dobíjet. Snaha vyvinout dobíjecí lithiovou baterii započala v 80. letech minulého století, ovšem selhala díky vysoké nestabilitě lithia, které se používalo jako materiál, ze kterého byla vyráběna anoda článku. Cyklické nabíjení a vybíjení vytvářelo na anodě dendrity. Jedná se o miniaturní vlákna lithiového kovu, které pronikala skrz separátor až k druhé elektrodě. Jakmile došlo k propojení obou elektrod, vznikl elektrický zkrat. Díky zkratu docházelo k přehřátí článku nad teplotu tání lithia a následnému výbuchu baterie. Z tohoto důvodu směřoval vývoj k použití lithia ne jako kovu, ale pouze využívání iontů lithia, proto se pro tento typ baterií používá zkratka Li-ion. [2,3]

Obdobně jako zbylé druhy baterií jsou i Li-ion baterie tvořeny dvěma elektrodami. Katoda (kladná elektroda) je tvořena oxidem kovu lithia a anodu (záporná elektroda) vytváří porézní uhlík. Během vybíjení proudí ionty od anody ke katodě skrz elektrolyt a separátor. Hlavní funkcí separátoru je oddělit anodu od katody a zabránit tak elektrickému zkratu, zároveň ale musí být skrz separátor umožněn průchod iontů. [4,5]

## 1.1 Výhody a nevýhody Li-ion baterií

Veškeré technologie mají své kladné a záporné stránky. Lithium iontové baterie nejsou v tomto ohledu výjimkou. Nejprve je potřeba této technologii porozumět a zjistit, zda pro danou aplikaci použití této technologie přinese spíše výhody, či jestli naopak nebudou převažovat její nevýhody. Údaje byly čerpány převážně ze zdroje. [6]

Tab. 1 Porovnání vlastností různých druhů baterií [7]

Typ baterií	NiCd	NiMH	Olověné	Li-ion	Li-ion polymer	Dobíjecí alkalické
Energetická hustota W/kg	45-80	60-120	30-50	110-160	100-130	80
počet cyklů (k 80% počáteční kapacity)	1500	300 až 500	200 až 300	500 až 1000	300 až 500	50
Doba rychlodobíjení	1h	2-4h	8-16h	2-4h	2-4h	2-3h
Odolnost proti přebíjení	střední	nízká	vysoká	velmi nízká	nízká	střední
Samovybíjení za měsíc (pokojová teplota)	20%	30%	5%	10%	~10%	0.3%
napětí článku (nominal)	1.25V	1.25V	2V	3.6V	3.6V	1.5V
<b>Proud</b>						
- špičkový	20C	5C	5C	>2C	>2C	0.5C
- optimální	1C	0.5C nebo nižší	0.2C	1C nebo nižší	1C nebo nižší	0.2C nebo nižší
Provozní teplota	-40 to 60°C	-20 to 60°C	-20 to 60°C	-20 to 60°C	0 to 60°C	0 to 65°C
Interval údržby	30 až 60 dnů	60 až 90 dnů	3 až 6 dnů	není vyžadován	není vyžadován	není vyžadován
Běžná cena baterie	\$50	\$60	\$25	\$100	\$100	\$5
Cena na jeden cyklus(US\$)	\$0.04	\$0.12	\$0.10	\$0.14	\$0.29	\$0.10-0.50
Komerčně dostupné od	1950	1990	1970	1991	1999	1992

### 1.1.1 Výhody

#### Vysoká energetická hustota

V porovnání s ostatními typy elektrochemických článků mají Lithium-iontové baterie poměrně vysokou energetickou hustotu. Tento fakt je jednou z hlavních výhod Li-Ion baterií. Energetická hustota ovlivňuje hmotnost a dojezd vozidla. Energetická hustota se udává v kWh/kg. Jestliže má tedy benzín energetickou hustotu 46,9 kWh/kg znamená to, že v 1 kg benzínu je uložena energie 46,9 kWh. Oproti tomu energetická hustota li-ion baterií je pouze 0,2 kWh/kg. [4,7,8]

## **Samovybíjení**

Při skladování jakýchkoliv baterií dochází k jejich samovolnému vybíjení. Lithium iontové baterie mají tu výhodu, že hodnota jejich samovybíjecích proudů je v porovnání s ostatními typy dobíjecích baterií (NiCd, NiMH) velice nízká. [4,7]

## **Inicializace**

Některé druhy dobíjecích baterií nelze ihned po jejich zakoupení dobít, ale je potřeba je před jejich prvním použitím pro provozování nejprve připravit. [4,7]

## **Údržba**

Výhodou lithium iontových baterií je, že nevyžadují speciální údržbu pro udržení maximální doby jejich životnosti. NiCd baterie například vyžadují pravidelné vybíjení, aby byl odstraněn jejich paměťový efekt. K tomuto jevu u Li-ion baterií nedochází. [4,7]

## **Dostupnost**

Díky výše zmíněným výhodám je tento typ baterií velice rozšířen a nabízen na trhu v mnoha variantách. Můžeme ho tak nalézt téměř ve všech elektrických zařízeních, které potřebují být nezávislé na dodávce elektrické energie z rozvodné sítě. Jedná se tak o zařízení od mobilních telefonů až po elektrická vozidla. [4,7]

### **1.1.2 Nevýhody**

Lithium-iontové baterie ovšem i přes své nesporné výhody nejsou zcela ideálním zásobníkem elektrické energie. Jako veškeré technologie, má i tato své nevýhody, které je potřeba brát na vědomí.

## **Ochrany**

Lithium-iontové články nejsou tak robustní, jako ostatní typy dobíjecích baterií. Vyžadují ochranu proti přebíjení a příliš hlubokému vybíjení. Dále potřebují ochrany proti překročení maximálního proudu. Z tohoto důvodu potřebují lithium iontové články pro podporu své činnosti obvody, které zajistí bezpečné provozování baterií. S využitím současných regulačních technologií lze ale zvládnout i tento problém a může tak být zajištěno bezpečné provozování lithium-iontových článků. [4,7]

## **Stárnutí**

Stárnutí je jedna z hlavních nevýhod Li-ion baterií, která je pro uživatele velice nepříjemná. Stárnutí nezávisí pouze na stáří baterie, ale také na počtu nabíjecích a vybíjecích cyklů, které baterie prodělala. Při skladování typických lithium kobalt oxid (LCO) baterií nebo článků, je vhodné tyto články částečně nabít – okolo 40-50% jejich kapacity a udržovat je v chladu. Takovéto skladování pomůže prodloužit délku jejich životnosti. [4,7]

## **Přeprava**

Na přepravu Li-ion baterií, zvláště na leteckou, mohou být kladeny určitá omezení. Přestože mohou být baterie přepravovány jako příruční zavazadlo, nemělo by se jich přepravovat větší množství, než je bezpodmínečně nutné. Každá baterie musí být opatřena záslepkami, které zabrání zkratování svorek. V opačném případě by mohlo dojít k požáru. [4,7,9]

## **Cena**

Další nevýhodou těchto baterií je jejich vysoká cena. V porovnání s NiCd články jsou Li-ion přibližně o 40% dražší. To je příčinou toho, že nejsou opravdu masově používány ve veškeré elektronice, kde každý výdaj navíc představuje problém. [4,7]

## **Mladá technologie**

Lithium iontové baterie jsou stále se vyvíjející technologií. To může být problémem v případě, že se v aplikaci spoléháme na stále stejné parametry. Nicméně příchod stále nových technologií konstrukce baterií s sebou většinou přináší pouze výhody v podobě lepšího řešení pro danou aplikaci. [4,7]

## 1.2 Parametry popisující provozní stavy baterií

### 1.2.1 SOC, DOD

K popisu zbývajících množství energie uložené v baterii se používají dvě zkratky převzaté z anglické literatury. První z nich je zkratka SOC (state of charge). Jedná se o poměr energie uložené v aktuálním okamžiku v baterii k maximálnímu množství energie, které lze do baterie uložit. Jestliže je tedy baterie plně nabita, je její SOC 100%. Parametr SOC je v elektrických vozidlech používán jako ekvivalent k množství zbývajících paliva u vozidel se spalovacím motorem. Druhým parametrem popisující aktuální stav baterie je DOD (depth of discharge). Popisuje množství náboje odebraného z článku, nebo z baterie. Množství náboje je uváděno v ampérhodinách (Ah). Kapacita článku je uváděna výrobcem a značí množství náboje, které je možné do baterie uložit. Jestliže tedy dojde k úplnému vybití baterie, bude údaj SOC odpovídat 0%, a parametr DOD bude odpovídat kapacitě článku. [3]

### 1.2.2 SOH

SOH (state of health) – tento parametr značí kondici baterie, každá Li-ion baterie stárne a postupně ztrácí svoji kapacitu. Tento parametr se uvádí v procentech aktuální maximální kapacity, vůči kapacitě udávané výrobcem. Náповědou pro zjištění SOH může být zvyšující se vnitřní odpor baterie, pokles kapacity, počet absolvovaných nabíjecích, nebo vybíjecích cyklů, nebo hodnota samovybíjených proudů. [3]

### 1.2.3 C-rate

C-rate se uvádí se jako parametr popisující proudovou zatížitelnost baterie při jejím nabíjení i vybíjení. Jsou-li u baterie uvedeny parametry, např.: kapacita 2000 mAh a maximální nabíjecí proud 0,8 C, potom se hodnota maximálního nabíjecího proudu zjistí vynásobením kapacity baterie konstantou 0,8. V tomto případě bude tedy maximální nabíjecí proud 1600 mA. [10]

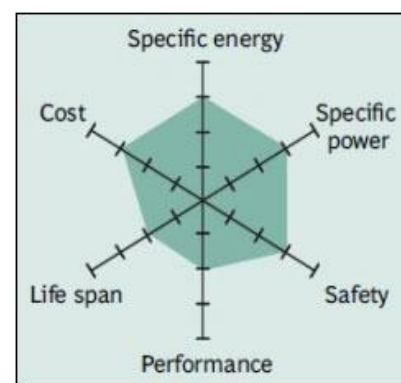


### 1.3 Druhy Lithium-iontových baterií

Existuje více druhů lithium-iontových baterií. Zpravidla se odlišují materiálem, ze kterého je tvořena katoda článku. Od použitého materiálu se také odvozuje název článku. Je také snaha nahradit uhlíkovou anodu moderními materiály. Materiál, který je použit pro katodu udává charakter článku. Některé materiály umožňují dosáhnout vyšší energetické hustoty, ovšem toto může být vykoupeno nižší bezpečností článku, kratší životností článku, nebo jeho vyšší cenou. Je tedy potřeba vybírat materiál s ohledem na budoucí použití vyráběného akumulátoru. Pro použití v elektronice je vhodné zvolit článek s vyšší energetickou hustotou, který zabezpečí zařízení dodávku elektrické energie po dostatečnou dobu, aniž by bylo potřeba použít akumulátor s příliš velkými rozměry a váhou. Naopak pro trakční akumulátory je vhodné zvolit materiál, který umožní článku vydržet dostatečný počet cyklů nabíjení a vybití a zároveň dosáhnout dostatečné bezpečnosti článku, čímž se myslí nižší pravděpodobnost jeho exploze. Informace v následující kapitole byly čerpány ze zdroje [11].

#### 1.3.1 Lithium Cobalt Oxide(LiCoO<sub>2</sub>)

Baterie, jejichž katoda se skládá z tohoto materiálu, jsou díky své vysoké energetické hustotě vhodné zejména pro použití ve spotřební elektronice, jako jsou mobilní telefony, notebooky, digitální fotoaparáty, kamery, atd.. Katoda baterie se skládá z oxidu kobaltu a anoda z uhlíku. Katoda se skládá z více vrstev materiálu a během vybíjení se volné ionty lithia pohybují směrem od anody ke katodě. Nevýhodou Li-cobalt baterie je relativně nízká životnost a omezené možnosti zatížení. U LCO článku 18650 se doporučuje jako optimální dobíjecí/vybíjecí proud o hodnotě 0,8 C. Ochranné obvody omezují proud na maximální hodnotu přibližně 1 C. To znamená, že baterie s kapacitou 2400 mAh může být zatěžována proudem maximálně 2400 mA.



Obr. 1 Vlastnosti LCO baterie [11]

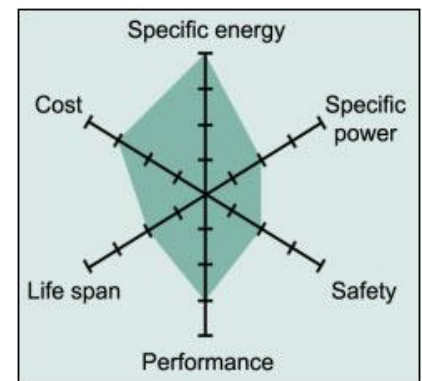
### 1.3.2 Lithium Manganese Oxide ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ )

Jako materiál, z něhož se vyrábí katoda, je použit oxid lithia a manganu. Výhodou tohoto článku je lepší tepelná stabilita a nízký vnitřní odpor. Tyto vlastnosti jsou dány spinelovou strukturou materiálu. Je tak umožněno vybíjení a nabíjení článku vyššími proudy. Nevýhodou je kratší životnost.

Právě vnitřní odpor článku je klíčem k vyšší proudové zatížitelnosti článku, jak proudem vybíjecím, tak proudem, kterým je baterie nabíjena. Z tohoto důvodu lze LMO článek 18650 o obdobné kapacitě, jako předchozí, zatěžovat proudem 20 – 30A. Je možné článek pulzně zatížit po dobu jedné sekundy proudem až 50A. Vše je opět limitováno teplotou článku, která nesmí překročit 80°C. Tento druh článků je díky svým vlastnostem hojně využíván v elektrickém nářadí, lékařských přístrojích a své využití nalezne hlavně ve vozidlech na elektrický pohon.

Li-manganové baterie mají přibližně o jednu třetinu nižší kapacitu v porovnání s bateriemi Li-kobaltovými. Stále však mají přibližně o 50% vyšší kapacitu v porovnání s bateriemi, jejichž základ tvoří nikl, např. NiMH.

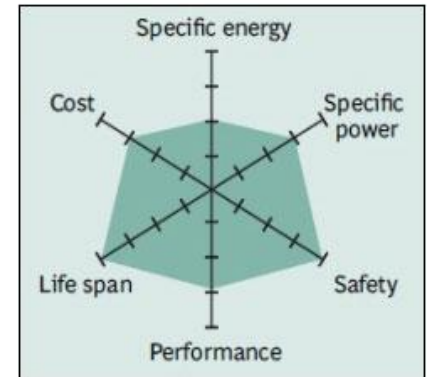
LMO články se vyrábějí ve dvou verzích. Jedny o vyšší kapacitě, které využívají např. výrobci spotřební elektroniky, pro maximalizaci výdrže provozu zařízení na baterie. Druhý typ nedosahuje při stejných rozměrech tak vysoké kapacity, ale v porovnání s vysokokapacitní verzí má mnohem delší životnost. Z tohoto důvodu se spíše hodí pro použití v elektrických vozidlech.



Obr. 2 Vlastnosti LMO baterie [11]

### 1.3.3 Lithium Iron Phosphate (LiFePO<sub>4</sub>)

Fosfát byl jako katoda článku poprvé použit v roce 1996. Jeho použití nabízí dobrý elektrochemický výkon a nízký vnitřní odpor článku. Klíčové jsou parametry jako vysoká bezpečnost, nevýbušnost, dobrá tepelná stabilita, poměrně dobrá odolnost vůči proudovému přetěžování a dlouhý životní cyklus. LFP články se vyznačují nižším napětím (3,3 V/článek), což je méně než zbylé Li-ion baterie. Tento fakt trochu snižuje množství uložené energie v článku. Výkon baterie může navíc snížit nízká provozní teplota a naopak příliš vysoká teplota zkracuje její životnost. Tyto negativní vlastnosti se projevují ovšem méně, než u olověných, NiCd, nebo NiMH baterií.

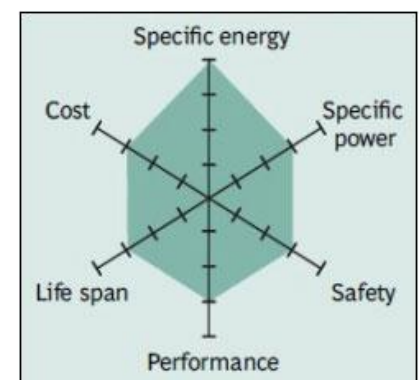


Obr. 3 Vlastnosti LFP baterie [11]

### 1.3.4 Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (LiNiMnCoO<sub>2</sub>)

Dalším používaným materiálem pro výrobu katody lithium-iontové baterie je kombinace niklu, manganu a kobaltu (NMC). V porovnání s Li-manganovou (LMO) baterií lze tento druh navrhnout na míru, dle požadavků budoucí aplikace. Lze navrhnout článek s vysokým měrným výkonem, nebo naopak s vysokou měrnou kapacitou. Nelze ovšem dosáhnout zároveň obojího, a proto je vždy nutné volit kompromis.

Kouzlo baterie tkví v kombinaci niklu a manganu. Nikl je známý svojí vysokou měrnou energií, ovšem také nízkou stabilitou. Výhoda manganu ovšem je, že tvoří spinelovou strukturu, která je stabilní, nabízí nízký vnitřní odpor článku, ale naopak nízkou měrnou energii. Kombinace těchto dvou materiálů ve vhodném poměru nám tak umožní navrhnout článek takové vlastnosti, které jsou pro danou aplikaci nejvhodnější.

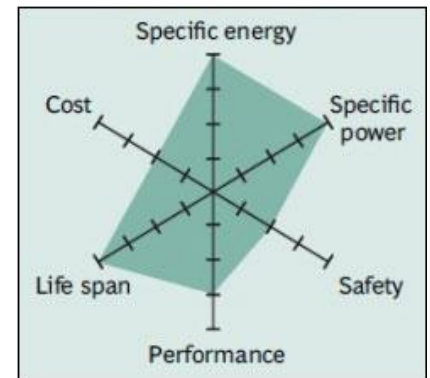


Obr. 4 Vlastnosti NMC baterie [11]

NMC baterie jsou vhodnou volbou pro elektrické nářadí a také pro aplikace ve vozidlech na elektrický pohon.

### 1.3.5 Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (LiNiCoAlO<sub>2</sub>)

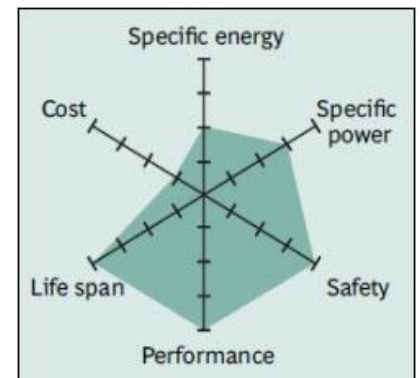
Tento druh baterií, známých také pod zkratkou NCA, není příliš komerčně využíván. Jeho vysoký měrný výkon, kapacita a životnost, ale upoutávají pozornost automobilového průmyslu. Nevýhodou tohoto článku je ovšem vysoká cena a horší bezpečnost při provozu.



Obr. 5 Vlastnosti NCA baterie [11]

### 1.3.6 Lithium Titanate (Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>)

Baterie s lithiím titanovou anodou jsou známé od osmdesátých let minulého století. Lithium nahrazuje uhlíkovou anodu, která je tak typická pro lithium-ion baterie, anodou vyrobenou lithiím-titanových nanokrystalů, které vytvoří spinelovou strukturu. Tato technologie umožní dosáhnout, díky pórovitosti, mnohem větší plochy anody, což umožní její zatěžování vyššími proudy. Baterie tak může být rychle dobíjena a zatěžována proudy až 10 C. Životnost článku je v porovnání s ostatními Li-ion bateriemi vyšší, vydrží 3000 – 7000 cyklů. Dále se tento typ baterie vyznačuje dobrou bezpečností při provozu, má skvělé vlastnosti i při nízkých provozních teplotách. Při teplotě okolí -30°C má stále 80% své kapacity. V porovnání s ostatními Li-ion bateriemi má poměrně nízkou hustotu energie (65 Wh/kg). Články se dobíjejí na konečné napětí 2,8V a mohou být vybíjeny až na hodnotu 1,8 V. Díky své dlouhé životnosti a velkému počtu vybíjecích cyklů, jsou baterie vhodné pro zálohování důležitých systémů. [12]



Obr. 6 Vlastnosti LTO baterie [11]

### 1.3.7 Shrnutí

Li-kobaltové články jsou jasným vítězem v množství skladované energie na jednotku hmotnosti. Z hlediska měrného výkonu, teplotní stability, životnosti a bezpečnosti vycházejí nejlépe Li-manganové a Li-fosfátové baterie. Z tohoto důvodu je tento typ baterií nejvhodnější pro aplikaci v elektrických a hybridních vozidlech.

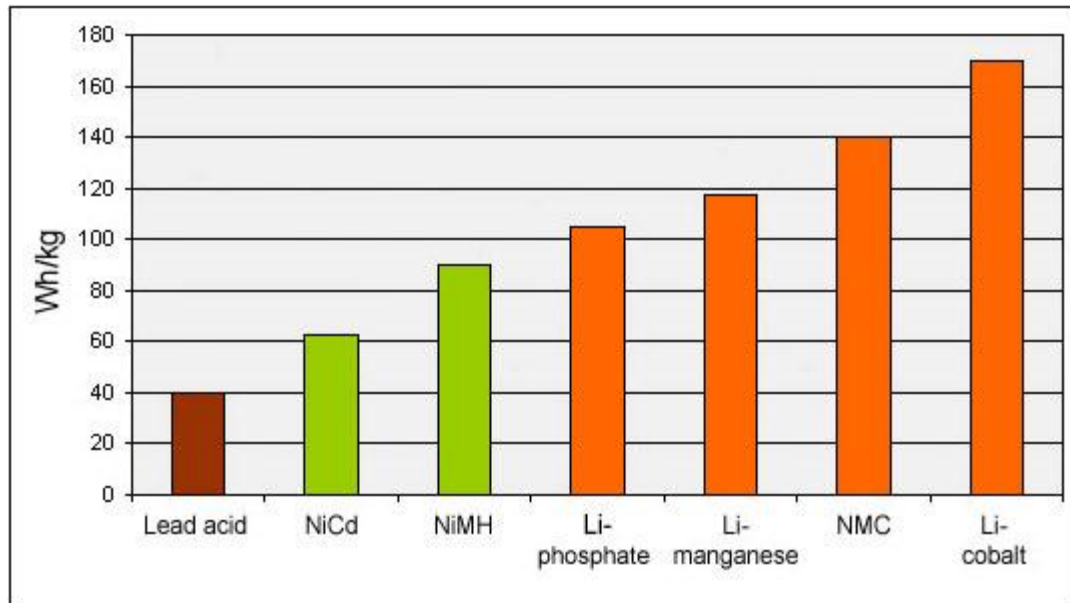
Tab. 2 Zkratky používané pro různé druhy Li-ion baterií [11]

Název	Materiál	Zkratka	Zkráceně	Poznámka
Lithium Cobalt Oxide	$\text{LiCoO}_2$	LCO	Li-cobalt	vysoká kapacita, baterie pro telefony, notebooky, kamery, ...
Lithium Manganese Oxide	$\text{LiMn}_2\text{O}_4$	LMO	Li-manganese, nebo spinel	vyšší bezpečnost, nižší kapacita oproti LCO, ale vysoký měrný výkon a dlouhá životnost, pro elektrické nářadí, elektrická kola, vozidla
Lithium Phosphate	$\text{LiFePO}_4$	LFP	Li-phosphate	
Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide	$\text{LiNiMnCoO}_2$	NMC	NMC	
Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide	$\text{LiNiCoAlO}_2$	NCA	NCA	stále větší zastoupení v elektrické trakci a zálohování elektrických sítí
Lithium Titanate	$\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$	LTO	Li-titanate	

Tab. 3 Provozní parametry Li-ion baterií [5]

Název	Napětí jmenovité	Maximální napětí	Měrná hustota energie	Proudové zatížení (C-rate)
Lithium Cobalt Oxide	3,6 V	4,2 V	150 - 190 Wh/kg	1C
Lithium Manganese Oxide	3,8 V	4,2 V	100 - 135 Wh/kg	10C, 40C pulzně
Lithium Phosphate	3,3 V	3,6 V	90 - 120 Wh/kg	35C
Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide	3,6 / 3,7 V	4,2 V	140 - 180 Wh/kg	10C

Následující graf porovnává energetickou hustotu olověných, niklových a lithiových článků. Vyplývá z něho, že z porovnávaných článků má nejvyšší energetickou hustotu LCO baterie.



Obr. 7 Měrná kapacita akumulátorů elektrické energie [11]

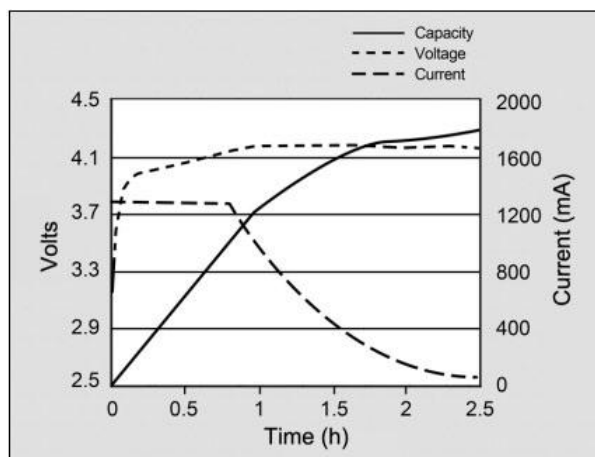
V současné době se na trhu objevují první dostupné vzorky Li-Sulfur (Li-S) baterií. Jejich hlavní výhodou je několikanásobně vyšší měrná hustota energie v porovnání se současnými běžně dostupnými Li-ion bateriemi, které již dosahují svých limitů. Li-S baterie využívají přímo kov Lithium, což jim umožňuje dosáhnout měrné hustoty energie až 400 Wh/kg, přitom teoretické předpoklady hovoří až a 2700 Wh/kg. V minulosti byl u těchto článků problém s nízkým počtem cyklů nabíjení. V současné době dosahuje počet nabíjecích cyklů až 2000 při ztrátě 20 % a 750 cyklů pro ztrátu 4% původní kapacity. Kromě vysoké měrné hustoty energie je výhodou těchto článků také odolnost vůči hlubokému vybíjení. Rovněž nedochází k rychlejší ztrátě kapacity článků ani při nabíjení na plnou kapacitu článku. To je výhodou vůči klasickým Li-ion bateriím, které mohou být využívány pouze v rozsahu 80 % své kapacity, chceme-li zabránit jejich rychlejšímu opotřebení. [22,23]

Nevýhodou Li-S článků je hlavně jejich vysoká cena. I přesto se jeví jako velice perspektivní a pravděpodobně dojde k jejich rozšíření spojené s rozšířenější sériovou výrobou. To by mohlo snížit jejich současnou vysokou cenu na přijatelnější úroveň. [22,23]

## 1.4 Nabíjení

Většina li-ion článků se nabíjí maximálně na napětí 4,2 V. Vyšší napětí může sice zvýšit kapacitu, ale také velice zkrátit životnost článku. Rozdíl od ostatních typů baterie je hlavně ve vyšším napětí článku a absenci výraznější změny napětí v okamžiku dosažení maximální kapacity, jako je tomu třeba u baterií NiMH.

Nabíjení li-ion baterií má dvě fáze. První fáze probíhá při konstantním proudu o velikosti přibližně 0,5 – 1 C. Napětí článku v této fázi vzrůstá z počáteční hodnoty, která závisí na hloubce vybití, až na maximální velikost napětí článku. Po dosažení 4,2 V již toto napětí zůstává konstantní a nabíjecí proud začne pozvolna klesat. Celková doba nabíjení je zhruba 3 hodiny, z čehož první fáze trvá jednu hodinu, a zbytek přibližně hodiny dvě. Plného nabití článku tedy není dosaženo v okamžiku, kdy se napětí přiblíží k hodnotě 4,2 V. [13]



Obr. 8 Průběh SOC, napětí a proudu [12]

Nabíjení vyšším proudem celkově dobu nabíjení příliš nezkrátí. Je sice rychleji dosaženo napětí 4,2 V, ale o co se zkrátí první část nabíjení, o to se prodlouží část druhá. Okamžik dosažení plné kapacity článku je zpravidla v okamžiku, kdy nabíjecí proud klesne na 3% své původní hodnoty. U některých druhů bateriových paků může být dosažení maximální kapacity indikováno zvýšením teploty přibližně o 5°C. [13]

Není vhodné udržovat napětí článku na jeho maximální hodnotě, protože je vyšší pravděpodobnost toho, že dochází k oxidaci elektrod. Pro zvýšení životnosti baterie je vhodné ji po úplném nabití od nabíječky odpojit, nebo použít inteligentní nabíječku, která bude napětí udržovat nižší. Toho se využívá například u notebooků, které jsou delší dobu používány jako stolní počítače. Jejich baterie nejsou nabíjeny na 100%, ale například pouze na 90%. [13]

Tab. 4 SOC v závislosti na napětí a době dobíjení článku [13]

Napětí článku	SOC po první fázi	Doba nabíjení	SOC po druhé fázi
3,80	60%	120 min	~65%
3,90	70%	135 min	~75%
4,00	75%	150 min	~80%
4,10	80%	165 min	~90%
4,20	85%	180 min	100%



## 2 Systém řízení baterie (BMS)

Životnost Li-iontové baterie, která je složena z více článků, je dána životností jejího nejslabšího článku. Jak již bylo zmíněno, tento typ článků je velice choulostivý na dodržování hodnot svého provozního napětí a na proudové přetěžování. Dosahuje-li napětí na některém z článků baterie hodnot, mimo stanovené limity, dojde u něho k výraznému zkrácení životnosti. Nevyváženost napětí na člancích může mít více příčin. Nejpravděpodobnější z nich jsou nestejněměrné tepelné namáhání, rozdílná vnitřní impedance článku, příliš velké rozdíly v kapacitě článků, nebo kolísání chemického složení. Rozdíly napětí na jednotlivých člancích během jejich provozu je možné minimalizovat vhodným výběrem článků a pečlivým návrhem sestavy. I při sebepečlivějším návrhu a výběru článků ovšem není možné odstranit vliv teplotního zatížení, které má největší vliv na vnitřní odpor článků, který se jeví jako největší problém Li-ion článků. Průchodem proudu skrz článek a jeho vnitřní odpor vznikají na tomto odporu ztráty  $P=RI^2$ , které se přeměňují na teplo. Toto odpadní teplo nejen že snižuje účinnost baterie, ale navíc může dojít k ohřevu článku nad přípustnou mez. Se vzrůstající teplotou se snižuje vnitřní impedance článku, což může tento tepelný spád ještě více urychlit. Navíc díky rozdílným teplotám může docházet k rozdílným v probíhajících elektrochemických reakcích. Další vlastností Li-iontových článků je, že se velikost samovybíjecích proudů společně se vzrůstem teploty o každých 10°C zdvojnásobuje. [1,3]

Jak již bylo psáno, provozování Li-ion baterií není možné bez systému, který zajistí bezpečné nabíjení a vybíjení článků tak, aby nedošlo k jejich poškození, či zkrácení životnosti. Správný BMS by měl umožňovat následující činnosti. První z požadavků na BMS je, aby dokázal monitorovat napětí na jednotlivých člancích baterie. Dále by takový systém měl umět co nejpřesněji odhadnout stav nabití článků (SOC), postarat se o bezpečné provozování článků, maximalizovat výkon, kapacitu a životnost baterie. Nakonec by měl tento systém umět zjištěné hodnoty poslat buďto uživateli, nebo nějakému externímu řídicímu zařízení.

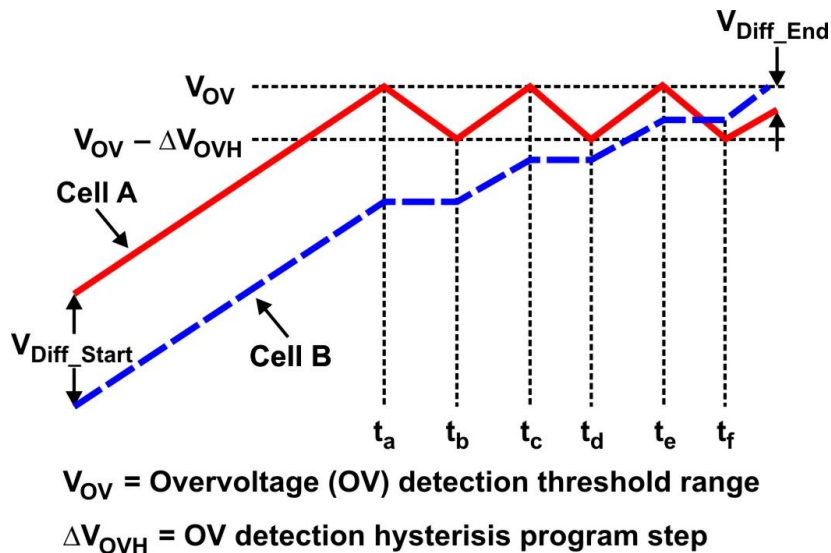
## 2.1 Úkoly BMS

Systém řízení baterie zajišťuje bezpečnost a maximální životnost článků následujícími zásahy: [1,3]

- 1) Zabráňuje překročení napětí nad stanovené limity článku. Dosáhne toho tak, že vypne nabíjecí proud, nebo zadá požadavek na jeho vypnutí.
- 2) Zabráňuje překročení maximální teploty, která je pro daný článek dovolena. Dosáhne toho tak, že vypne nabíjecí proud, nebo zadá požadavek na zapnutí přídavného chlazení.
- 3) Zabráňuje poklesu napětí pod stanovenou hodnotu například odpojením baterie od zátěže.
- 4) Hlídá hodnotu nabíjecího, nebo vybíjecího proudu. Ta nesmí překročit stanovené limity, protože by mohlo dojít k překročení limitů napětí článku, nebo přehřátí článku.

Během dobíjení je monitorováno napětí na článcích. Jakmile na jednom z článků dosáhne napětí stanovené meze, je nabíjení ukončeno, a to i v případě, že zbylé články ještě hodnoty maximálního napětí nedosáhly. Dobíjení je tedy limitováno článkem, který je jako první plně nabit. Stejně tak vybíjení je ukončeno, jakmile klesne napětí na prvním z článků na stanovenou minimální hodnotu. Tyto dvě kritéria stanovují výslednou kapacitu baterie.

Zvýšení kapacity celé baterie lze dosáhnout balancováním napětí jednotlivých článků. Během balancování se snaží systém pomocí různých mechanismů dosáhnout vyvážených hodnot napětí všech článků. Dojde tak ke zvýšení využití kapacity celé baterie, protože BMS se snaží dosáhnout toho, aby veškeré články baterie byly nabyty na maximální úroveň, ideálně 100% SOC.



Obr.9 Pasivní vyvažování vybíjením v závislosti na napětí [1];

Pozn.:

Cell A – Článek A, Cell B – Článek B

Overvoltage (OV) detection threshold range – Prahová velikost pro detekci přepětí

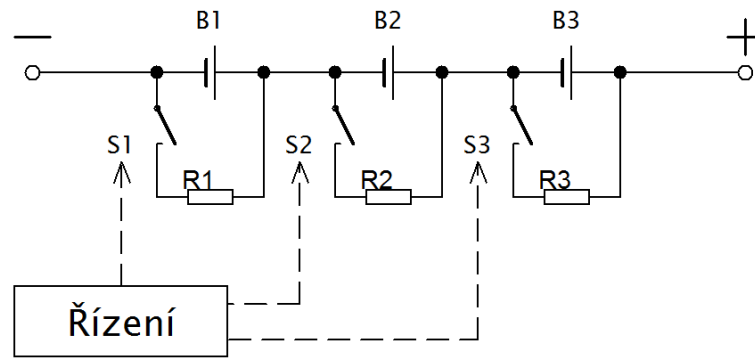
OV detection hysteresis program step – Velikost hystereze pro přepětíovou detekci

## 2.2 Druhy metod balancování

Hlavním cílem balancování je udržet SOC jednotlivých článků baterie, které jsou zapojeny do série, na stejné úrovni. Dle zdrojů [1,3,14] existují dva druhy základní balancování.

### 2.2.1 Pasivní balancování

Prvním, a jednodušším z nich je pasivní balancování. Jedná se o ztrátový způsob balancování. Z článku, na kterém je naměřeno nejvyšší napětí, je přebytečný náboj odebrán a zmařen na odpor, kde se přemění na teplo. Tento způsob balancování tedy vyžaduje ke každému článku baterie připojit vybíjecí odpor, který určí velikost vybíjecího proudu. Dále je potřeba ke každému odporu přiřadit spínač, který odpor ke článku připne v případě, že je potřeba napětí článku snížit tak, aby se přiblížilo zpět ke zbylým článkům. Jasnými nevýhodami pasivního balancování jsou ztráty energie a zároveň může docházet k přehřívání z důvodu přeměny energie na tepelnou.



Obr. 10 Pasivní balancování článků baterie

### 2.2.2 Aktivní balancování

Aktivní balancování se tedy může zdát jako ideální volba. energii nemaří na odporu, ale snaží se jí znovu využít. Během balancování tak nedochází k tak vysokým energetickým ztrátám, ani tepelnému ohřevu. I tato metoda však má své nevýhody. Jednou z nich je větší počet součástek, což se sebou nese vyšší složitost návrhu a cenu výsledného produktu. Další nevýhodou jsou ztráty, ke kterým dochází i v pohotovostním režimu, tedy i v okamžiku, že nedochází k balancování článků. Tyto ztráty bývají, v porovnání s pasivním balancováním, vyšší. Metoda aktivního balancování se hodí spíše pro aplikace, kde je požadováno balancování článků vysokým proudem. V tomto případě by totiž mohlo velké množství energie, která se přemění na tepelnou, způsobit nadměrný ohřev zařízení pro balancování.

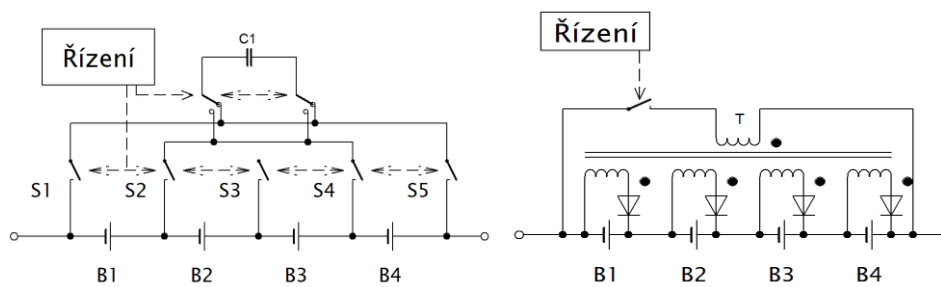
Vyvažování vysokými proudy je vyžadováno v aplikacích, kdy je vysoký rozdíl SOC mezi jednotlivými články, kdy je potřeba baterii extrémně rychle nabít a kdy je požadována vysoká účinnost nabíjení. Dále v případech, kdy články pracují při vysoké teplotě a jejich hodnota samovybíjecích proudů je tak vysoká.

Je řada možností zapojení a technik aktivního balancování. Nechají se rozdělit buď podle použitých součástek, které akumulují energii, nebo podle způsobu, kam a jak je náboj přemístován.

Během aktivního balancování lze energii přenášet následujícími směry:

- z článku do článku** – energie je přemísťována mezi jednotlivými články
- z článku do baterie** – energie je odebrána článku s nejvyšším napětím a dodána celé baterii
- z baterie do článku** – energie je odebrána z celé baterie a dodána článku s nejnižším napětím
- obousměrný** – z celé baterie do článku, nebo z článku do celé baterie, dle aktuální potřeby

Jako akumulátor energie pro přenos náboje mezi články se používají cívky a kondenzátory. Existuje množství zapojení, které se liší druhem akumulčních prvků a také směrem přenášení energie [15]



Obr. 11 Příklady aktivního balancování článků s využitím kapacitorů a cívek

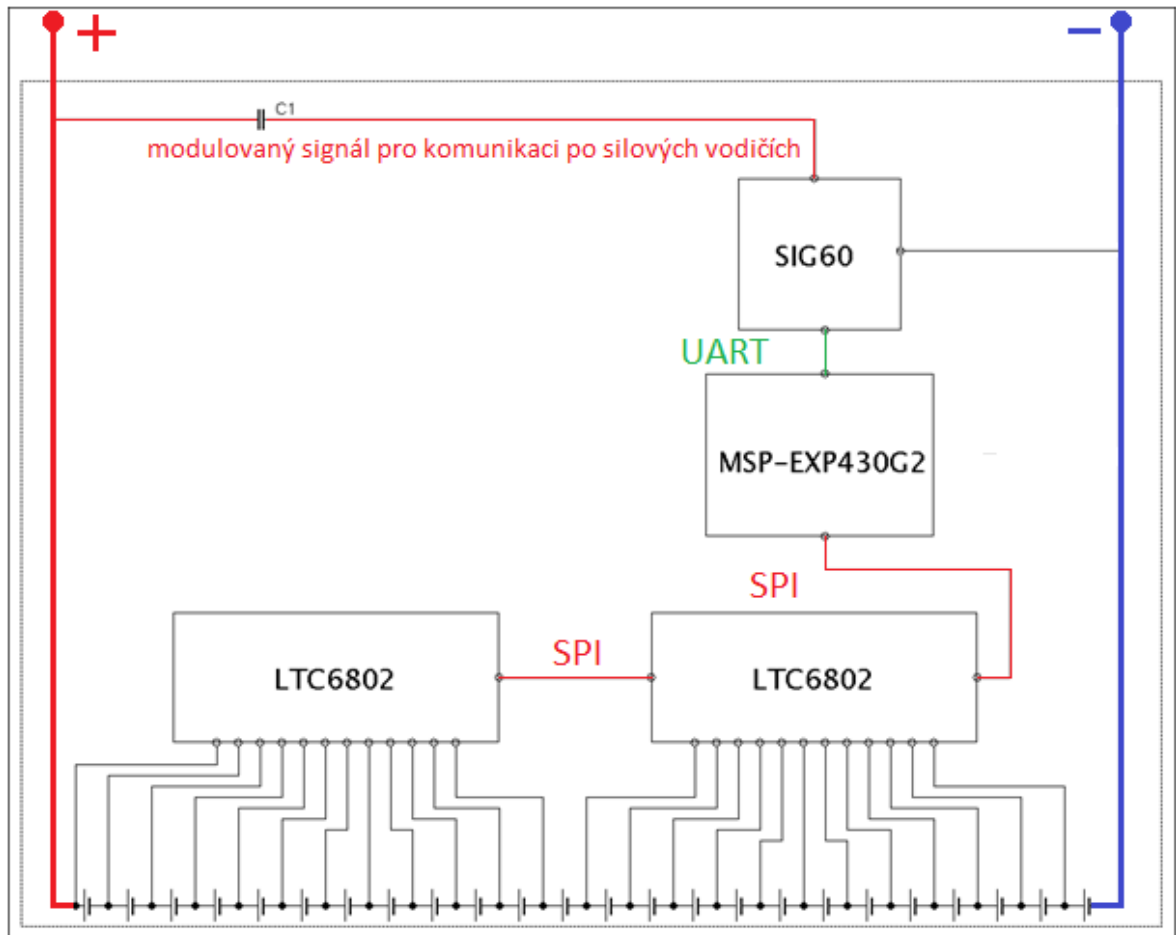
### 3 Návrh desky plošného spoje

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a realizovat systém řízení baterie (BMS) bez nutnosti použití komunikačních vodičů. Co vše systém řízení baterie obnáší, bylo podrobně popsáno v předchozích kapitolách. Jednou z jeho funkcí je posílat zjištěné informace o stavu baterie řídicímu systému. Tento centrální řídicí systém pak může zjištěné informace zobrazovat uživateli například na palubním počítači vozidla. Doposud probíhá komunikace výhradně pomocí zvláštních vodičů, například prostřednictvím RS232, RS485, CAN sběrnice, atd.. Jestliže je tedy v elektrickém vozidle použito větší množství baterií, vyžaduje každá z nich svůj systém řízení. Jednotlivé systémy řízení komunikují s nadřazenou jednotkou prostřednictvím vlastních komunikačních vodičů. Ruku v ruce se vzrůstajícím počtem baterií vzrůstá i počet komunikačních vodičů nad rozumnou úroveň. Vysoký počet vodičů může se sebou nést zbytečně se zvyšující náklady na materiál a navíc mohou zabírat prostor, který by bylo možné využít hospodárněji. Proto se v poslední době začínají objevovat pokusy vyřešit komunikaci pomocí silových vodičů, které jsou primárně určeny pro nabíjení a provozování baterií. Toto řešení by odstranilo nutnost používat speciální komunikační vodiče pro odesílání dat, protože by komunikace probíhala prostřednictvím silových vodičů, které jsou bezpodmínečně nutné pro provozování baterií.

#### 3.1 Základní části návrhu

V následující kapitole je stručně popsáno schéma funkce jednotlivých částí sestavy navrhovaného zařízení. Tyto jednotlivé části jsou podrobněji popsány v samostatných kapitolách.

Na následujícím obrázku je naznačeno spojení dvou LTC6802 v tzv. „daisy chain“-zapojení. Toto zapojení umožňuje zároveň balancovat akumulátor složený až z 24 článků. Dále je na obrázku blokově znázorněno připojení řídicího procesoru a obvodu pro modulaci komunikačního signálu na silové vodiče.



Obr. 12 Blokové schéma zařízení

Základ desky tvoří obvod LTC6802, který slouží k monitorování a balancování napětí jednotlivých článků baterie. Vzhledem ke složitosti zapojení a množství součástek byla zvolena deska s oboustranným rozložením plošných spojů. Aby bylo možné zároveň balancovat až 24 článků, byly použity dva obvody LTC6802, z nichž každý je umístěn na opačné straně desky. Tyto obvody posílají prostřednictvím sériové komunikace naměřené hodnoty řídicímu procesoru MSP430G2553IN20. Tento procesor je umístěn na vývojovém kitu od firmy Texas Instrument, který se prodává pod obchodním názvem MSP-EXP430G2 LaunchPad. Procesor vyšle příkaz pro zjištění napětí na jednotlivých člancích baterie obvodu pro balancování a po přijetí žádaných dat vyhodnotí, který z článků je potřeba balancovat. Zároveň odešle vybraná data desce s plošnými, jehož centrální částí je obvod SIG60, který je určen pro komunikaci po silových vodičích. Tento obvod zabezpečí modulaci signálu z procesoru na silové vodiče, které primárně slouží pro vedení provozních proudů bateriových článků. Celé zařízení by v ideálním případě umožňovalo připojení článků a celkové velikosti napětí až 120 V, které je dáno hodnotou maximálního napětí připojitelného ke dvěma LTC6802. Jelikož je ale na desce umístěn také pulzní stabilizátor napětí LM5008A,

který nedokáže pracovat s napětím o velikosti 120 V, je hodnota maximálního připojitelného napětí článků 95 V. LM5008 je navržen tak, aby jeho výstupní napětí bylo 3,3 V. Toto napětí je potřebné pro napájení vývojového kitu a obvodu pro komunikaci prostřednictvím silových vodičů. [16,17,20,21]

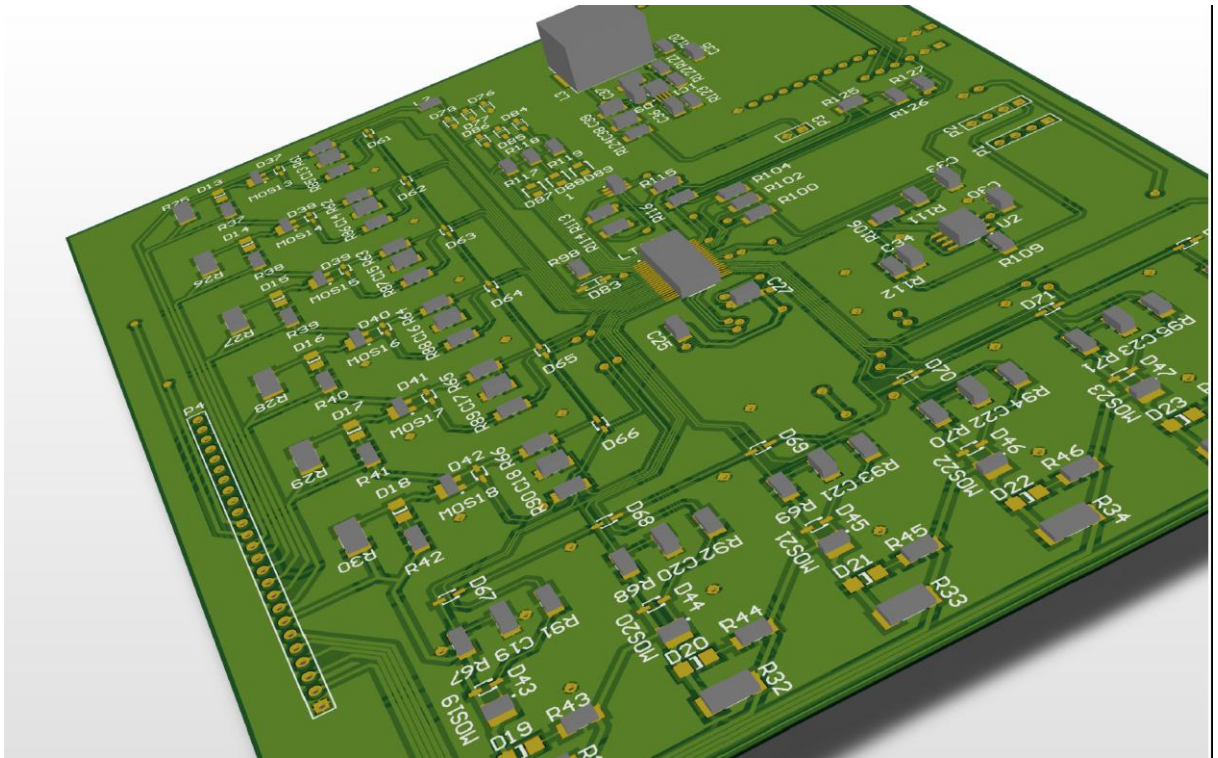
Během návrhu bylo potřeba dbát zvýšené pozornosti na udržení dostatečných izolačních vzdáleností. Na desce jsou totiž umístěny dva LTC6802 a celkové napětí všech článků připojených k těmto obvodům může dosáhnout hodnoty, až 120 V. Samotný integrovaný obvod je již navržen tak, aby rozdíl potenciálů mezi jednotlivými vývody byl co nejnižší. V budoucnu se počítá, že z připojených článků nebude napájen pouze obvod LTC6802, ale i zdroj, který vytvoří napětí 3,3V potřebné pro napájení LaunchPadu MSP430G2 a obvodu SIG60. Pro tento případ je na desce připraven pulzní snižovač napětí. Tento stabilizátor dokáže regulovat výstupní napětí na hodnotu 3,3V při hodnotách vstupního napětí 10 – 95 V. V současném návrhu má ovšem zatím vyvedené speciální svorky pro připojení vnějšího napájecího zdroje a prozatím není napájen z bateriových článků. To lze ovšem snadno vyřešit propojením vstupního konektoru napájecího zdroje přímo na balancovanou baterii pomocí zvláštních vodičů.

K této základní desce je pomocí konektorů připojen řídicí procesor a obvod pro bezdrátovou komunikaci. Obě dvě zařízení lze od desky velice snadno odejmout.

### 3.2 Altium Designer

Návrh desky s plošnými spoji byl proveden v programu Altium Designer, který obsahuje oproti Eaglu mnoho užitečných funkcí, jako je například automatické hlídání izolačních vzdáleností, kontrola kompletnosti zapojení a mnoho dalšího. Zajímavou funkcí je možnost prohlížet si desku ve 3D zobrazení. Velké množství funkcí, které Altium obsahuje, jej ale může činit oproti Eaglu trochu složitější na obsluhu. Jelikož není tento software pro návrh desek s plošnými spoji tak rozšířený, jako Eagle, je horší i dostupnost knihoven se součástkami. Z tohoto důvodu bylo potřeba většinu součástek vytvářet pomocí údajů z datasheetu a průvodců pro tvorbu pouzder součástek v Altium Designeru.



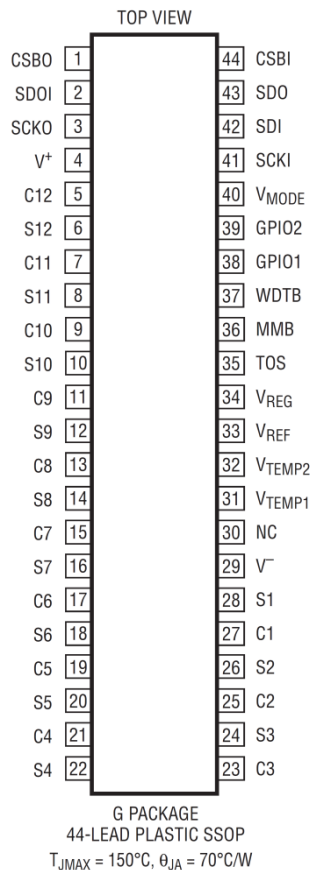


Obr. 13 3D zobrazení desky s plošnými spoji v programu Altium Designer

### 3.3 LTC6802

Jedná se o integrovaný obvod, speciálně konstruovaný pro monitorování bateriových článků. Jeho hlavním úkolem je při provozu monitorovat napětí na jednotlivých člancích baterie a vhodnými mechanismy docílit rovnoměrného rozložení napětí na všech člancích baterie tak, aby bylo dosaženo co nejdelší životnosti baterie. Informace o integrovaném obvodu byly čerpány z datasheetu součástky. [16]

LTC6802 je vybaven dostatečně přesným 12bitovým převodníkem, vlastním zdrojem referenčního napětí, výstupem pro sériovou komunikaci a vstupem pro dva snímače teploty. Každý LTC 6802 může měřit až 12 článků o celkové hodnotě napětí do 60 V. Tento obvod lze navíc sériově řadit za sebou v zapojení známém jako „daisy-chain“. Jestliže je zapotřebí, lze tak dosáhnout libovolného počtu balancovaných článků a to díky speciálnímu zapojení sériové komunikace. LTC 6802 tak lze propojit bez nutnosti použití optočlenů, či jiných prvků, které by oddělily různý napěťový potenciál. V následujícím textu bude označován obvod, který přímo komunikuje s procesorem a je tedy na spodní straně řetězce jako „bottom“ a obvod, který se od řídicího procesoru nachází nejdále jako top.



Obr. 14 Pouzdro LTC6802 [16]

### Vývody pouzdra integrovaného obvodu LTC6802

- CSBO** - chip select output, výstup pro ovládání dalšího LTC v řadě
- SDO1** - seriál data input output, výstup/vstup dat do dalšího LTC
- SCKO** - seriál clock output, hodinový výstup pro další LTC
- V+** - balancovaný článek s nejvyšším potenciálem
- C1 - C12** - vstupy pro monitorování napětí článků
- S1 - S12** - výstupy pro ovládání externích tranzistorů
- V-** - nejnižší potenciál balancovaných článků
- NC** - nezapojený vstup
- V<sub>TEMP1, 2</sub>** - vstupy pro čidla teploty
- V<sub>REF</sub>** - zdroj referenčního napětí (3,075 V)
- V<sub>REG</sub>** - výstup lineárního regulátoru napětí (5 V, 4 mA)
- TOS** - top of stack input, pro poslední LTC v řadě se připojí na V+, jinak V-
- MMB** - monitor mode, jestliže je připojen k V-, je LTC pouze v monitorovacím módu
- WDTB** - watchdog timer, v případě že na pinu SCKI není detekována aktivita po dobu 2,5 s, je stažen do nuly
- GPIO1, 2** - v monitorovacím módu slouží k nastavení počtu monitorovaných článků, jinak lze svázat s vnitřními registry LTC6802 a ovládat prostřednictvím nich externí zařízení
- V<sub>MODE</sub>** - nastavení napěťové/proudové komunikace, pro napěťovou připojit k V<sub>REG</sub>
- SCKI** - serial clock input, hodinový vstup pro přenos dat
- SDI** - serial data input, vstup dat
- SDO** - serial data output, výstup dat
- CSBI** - chip select input, výběr příslušného LTC

### 3.3.1 Popis činnosti LTC 6802

Multiplex integrovaného obvodu přepíná mezi jednotlivými vstupy, ke kterým jsou připojeny jednotlivé články baterie. Napětí jednotlivých článků je následně pomocí 12bitového sigma-delta převodníku převedeno z analogové hodnoty na digitální. Tento převodník v kombinaci s vnitřní napěťovou referencí dosahuje výjimečné přesnosti převodu.

Komunikace mezi LTC6802 a řídicím procesorem je realizována pomocí SPI. Tento typ komunikace je použit i v případě zapojení více obvodů do série. Data mohou být v tomto případě přenášena v obou směrech sériově zapojených obvodů. Pro izolaci jsou namísto optočtenů použity jednoduché diody.

LTC6802 obsahuje také vnitřní MOSFET tranzistory určené pro balancování napětí jednotlivých článků. Tyto tranzistory mohou být použity pro spínání vnějších tranzistorů v případě, že aplikace vyžaduje vybíjení článků vyšším proudem, který by již mohl vnitřní tranzistory integrovaného obvodu poškodit. Je důležité zdůraznit, že LTC6802 v žádném

případě neurčuje spínání jednotlivých tranzistorů. Veškerá jejich činnost je řízena vnějším procesorem. Řídící procesor zapisuje hodnoty do konfiguračních registrů uvnitř LTC6802. Pomocí těchto hodnot je následně řízeno spínání jednotlivých tranzistorů. Watchdog timer vypíná vybíjecí tranzistory v případě, že je komunikace s řídicím procesorem přerušena.

### Příkazy

Seznam zkratk nejvýznamnějších úkonů, které LTC6802 vykonává:

STCVAD- měření napětí článků

STOWAD - měření napětí s detekcí nepřípojeného vstupu

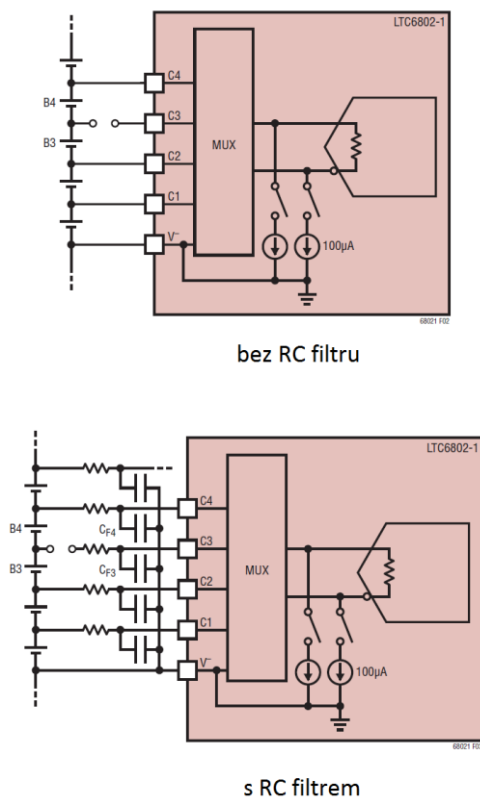
WRCFG – zápis do konfiguračních registrů

RDCFG – přečtení konfiguračních registrů

RDCV – čtení registrů s hodnotami napětí jednotlivých článků

RDFLG – čtení registru přerušení (od OV, UV)

### Detekce nepřípojeného vstupu



Odpojení vstupu od jednoho z článků (C pin), ovlivní měření napětí na dvou článcích. V aplikacích bez externí filtrace mezi C pinem a článkem dojde k tomu, že při běžném A/D převodu (příkaz STCVAD) LTC6802 naměří na článcích B3 a B4, v případě, že pin C3 je odpojen, hodnoty blízké nule. To je způsobeno tím, že během měření článku B3 způsobí vnitřní odpor převodníku přizvednutí C3 na potenciál C2. Obdobně během měření článku B4 způsobí tento odpor přizvednutí C3 na potenciál C4. Výsledná hodnota napětí je rozdílem napětí na těchto vstupech a je tedy velice blízká nule.

V aplikacích s externím RC filtrem způsobí odpojení C pinu jinou chybu měření. Zde již při měření článku nedojde k naměření hodnoty blízké nule, ale po několika cyklech měření dojde

Obr. 15 Detekce nepřípojeného vstupu [16]

k nabití kondenzátorů u článků B3 a B4 na polovinu součtu hodnot napětí na obou člancích. Takto naměřená hodnota neodpovídá realitě, proto je potřeba odpojení jednoho z článků od C pinu detekovat.

Pomocí příkazu STOWAD dojde ke stažení pinu C3 proudovým zdrojem 100  $\mu\text{A}$  během měření napětí na člancích B3 a B4. V důsledku toho dojde ke snížení naměřené hodnoty na článku B3 a zvýšení naměřené hodnoty na článku B4 v porovnání s použitím klasického příkazu STCVAD. Největší změna napětí je tak pozorována při měření článku B4, jestliže je vodič odpojen od pinu C3. Nejlepším způsobem jak tedy detekovat odpojení pinu C3 je tedy zaměřit se na rozdíl napětí naměřeného na vstupu C3 a C4. Jako práh napětí pro indikaci odpojení pinu je ideální hodnota +200 mV rozdílu napětí mezi články C3 a C4. Jestliže je ve vstupním RC filtru použit kondenzátor o hodnotě vyšší, než 0,1  $\mu\text{F}$ , je potřeba předtím, než dojde k vyhodnocení rozdílu napětí mezi jednotlivými články příkaz STOWAD opakovat vícekrát, aby došlo k dostatečnému vybití kondenzátoru a vytvořil se potřebný rozdíl napětí 200 mV. Taktéž dochází k naměření nepatrně odlišných hodnot napětí při použití příkazu STOWAD a STCVAD. Tento rozdíl je způsoben průchodem proudu 100  $\mu\text{A}$  přes vnitřní odpor multiplexu.

### **Měření napětí během vybíjení článku**

Příkazy primárně určené pro A/D převod a měření napětí (STCVAD a STOWAD) automaticky vypnou vybíjecí tranzistor článku, na kterém právě probíhá měření. Taktéž dojde k vypnutí vybíjecích tranzistorů článku nad a pod měřeným článkem. Dojde tak k minimalizaci chyby měření.

### **Použití S pinů jako ovládacích výstupů pro externí tranzistory**

S výstupy obsahují interní 10 k $\Omega$  pull up odpory, takže je lze použít jako digitální výstupy při zatížení jejich výstupu vysokou impedancí, například externím MOSFET tranzistorem. Pro aplikace vyžadující vysoké vybíjecí proudy je tedy vhodné připojit diskrétní tranzistor doplněný o vhodný vybíjecí odpor, jehož hodnota v kombinaci s napětím článku určí velikost vybíjecího proudu.

## Ztráty a tepelná ochrana

Interní tranzistory integrovaného obvodu mohou být použity v kombinaci s externě připojeným odporem o vhodné velikosti také přímo k balancování napětí článků baterie. Vše je ale omezeno proudovou zatížitelností těchto tranzistorů, respektive maximálním oteplením, které způsobí procházející proud. Veškeré elektrické parametry obvodu jsou garantovány do teploty 85 °C. Ohřev na hodnotu 105 °C nezpůsobí žádné nebo velice malé odchylky v naměřených hodnotách. Poškození obvodu může způsobit teploty vyšší než 150 °C. Z tohoto důvodu je doporučená maximální hodnota obvodu 125 °C.

Jako ochrana LTC6802 slouží vnitřní senzor teploty obvodu. Přehřátí mohou způsobit ztráty na vnitřních tranzistorech, nebo příliš častá sériová komunikace v proudovém režimu (komunikace mezi sériově řazenými LTC6802). Tento problém je pravděpodobnější, jestliže se pracuje s velkým rozdílem napětí mezi vstupy V+ a V-, nebo v případě, že je tepelná vodivost v okolí obvodu nízká.

Jestliže dojde k překročení teploty 145°C, dojde k resetování konfiguračního registru a vypnutí všech vybíjecích tranzistorů. Zároveň se zastaví také A/D převod. Jestliže dojde k přerušení činnosti v důsledku překročení teploty, registr THSD se automaticky nastaví na hodnotu high. Tento bit je opět vynulován přečtením registru o teplotách (příkaz RDTMP).

### Použití LTC6802 s méně než dvanácti články na vstupu

LTC6802 může být použito pro balancování méně než dvanácti článků. Minimální počet je dán minimálním napájecím napětím, které LTC6802 potřebují pro svoji činnost. To znamená, že minimální počet článků musí být takový, aby součet napětí na nich byl alespoň 10 V.

Jednotlivé články nelze k integrovanému obvodu připojovat libovolně, ale je potřeba začít od pinu V-, dále výše k pinům C1-C12. Vývody LTC6802, na které již nejsou připojeny články baterie, je potřeba propojit nakrátko a zároveň k nim připojit také pin V+, aby bylo zabezpečeno napájení integrovaného obvodu.

## Watchdog timer

Jestliže nedojde k detekci žádné aktivity na pinu SCKI po dobu 2,5 s výstup WDTB, je nastaven do nuly. Tento stav trvá do té doby, než dojde znovu k detekování činnosti na pinu SCKI.

Jestliže nastane aktivování „watchdog timer“, dojde k vyresetování všech registrů LTC6802 a tím pádem jsou všechny S piny vypnuté a nemůže tak dojít k tomu, že v důsledku chyby komunikace by byl neustále vybíjen pouze jeden článek baterie.

Jestliže LTC6802 v monitorovacím módu a jeho pin MBB je tedy stažen do nuly, nedochází k aktivaci „watchdog timer“.

### 3.3.2 Režimy provozu

LTC 6802 má tři režimy provozu: „standby“, „measure“ a „monitor“. „Standby mode“ je pohotovostní režim, při němž dochází k nejmenší spotřebě energie. V tomto režimu jsou veškeré obvody mimo sériového rozhraní vypnuty. V „measure“ režimu dochází k měření napětí na jednotlivých člancích akumulátoru. Aktuální naměřené hodnoty jsou průběžně ukládány do paměti. Současně také probíhá hlídání jednotlivých článků proti jejich přebíjení a příliš hlubokému vybíjení. V „monitor“ módu je u jednotlivých článků hlídáno pouze to, jestli nedochází k jejich přebíjení, nebo příliš hlubokému vybíjení. Jestliže ano, je tento stav indikován pomocí SDO pinu. Sériová komunikace není v tomto monitorovacím módu umožněna.

#### Standby mode

Po zapnutí je LTC6802 automaticky uveden do pohotovostního režimu. V pohotovostním režimu dochází k nejmenší možné spotřebě elektrického proudu. Všechny obvody jsou vypnuty kromě sériové komunikace a regulátoru napětí. K minimální spotřebě elektrické energie dochází v případě, že jsou všechny logické výstupy SPI komunikace nastaveny do logické jedničky. Do „standby“ módu je integrovaný obvod uveden, jestliže konfigurační bit CDC je nastaven na hodnotu 0.

## Měřicí režim

Do měřicího módu se integrovaný obvod uvede tím, že se přeprogramuje CDC bit z hodnoty 0 na hodnotu 1-7. Integrovaný obvod monitoruje napětí na každém článku a v případě potřeby, je-li na některém článku naměřeno přepětí (OV), či naopak podpětí (UV), generuje signál pro přerušení, který je vysílán řídicímu procesoru prostřednictvím SDO pinu. Jsou dvě metody jak OV/UV signalizovat. První z nich je tzv. „toggle polling“, která k tomuto účelu používá signál o frekvenci 1 kHz a „level polling“, která používá pouze výstupní stav „high“, nebo „low“.

Hodnoty, při kterých je signalizováno UV/OV lze nastavit prostřednictvím bitů VUV a VOV. Hodnota flag registru je přepsána, jestliže dojde k překročení hodnoty napětí nastavené v registru VUV a VOV. Stav jednotlivých flag registrů ke každému článku se nechá zjistit pomocí příkazu RDFLG (Read Flag Register Group).

Jestliže je k LTC6802 připojeno méně než 12 článků, je nutné nezapojené vstupy maskovat. K tomuto účelu se využívá MCxI bit v konfiguračním registru. Jestliže je pomocí tohoto registru zamaskován např. desátý článek, dojde k automatickému zamaskování článků zbývajících, tedy i jedenáctého a dvanáctého.

Integrovaný obvod může sledovat stav napětí (OV/UV) na jednotlivých člancích nepřetržitě. Snížení spotřeby elektrické energie potřebné pro napájení obvodu lze dosáhnout tím, že je tento stav sledován v určitých intervalech. Délku tohoto intervalu lze nastavit pomocí CDC bitu.

Pro zahájení měření musí být nejdříve poslán příkaz STCVAD (začátek A/D převodu a poll status). Po odeslání tohoto příkazu začne LTC6802 odesílat zpět hodnoty naměřené pomocí A/D převodníku a to prostřednictvím buď „toggle polling“, nebo „level polling“ metody. Jestliže je v registrech nastaveno, že je připojeno méně než 12 článků, např. 10, dojde k měření napětí pouze na prvních deseti člancích. Dosáhne se tak snížení spotřeby elektrické energie i úspory času. Během měření napětí na jednotlivých člancích je současně kontrolováno napětí článků a v případě, že dochází u některých k přebíjení, nebo hlubokému vybíjení (UV/OV), je tento stav reflektován přepsáním flag registru příslušného článku. Po

dokončení měření přejde obvod zpět do monitorovacího módu, kdy jsou články kontrolovány vůči UV/OV v intervalech nastavených pomocí CDC bitu.

### **Monitorovací mód**

LTC6802 může být použit i jako obvod bez sériové komunikace, který slouží pouze pro monitorování napětí na jednotlivých člancích. Docílí se toho tak, že se MMB bit stáhne do logické nuly. Přerušování je signalizováno pomocí SDO pinu s využitím „toggle polling“ metody. Na rozdíl od předchozího je toggling nezávislý na stavu CSBI pinu.

Když je MMB bit stažen do nuly, dojde k vyresetování nastavení do výchozího stavu. Hodnoty uložené v registrech VUV, VOV a CDC jsou ignorovány a místo toho jsou použity výchozí hodnoty. Počet připojených článků se nechá nastavit pomocí logických úrovní připojených k WDTB a GPIO pinům.

Jestliže je MMB pin uveden zpět do logické jedničky, dojde k deaktivaci „monitor modu“, ovšem hodnoty v registrech VUV, VOV a CDC zůstanou vyresetovány. Jestliže je potřeba pro ně mít jiné, než výchozí nastavení, je potřeba je opět přeprogramovat.

### **3.3.3 Sériový port**

#### **Přehled**

LTC6802 je vybaven klasickým sériovým periferním rozhraním SPI, které umožňuje řetězově spojit více LTC6802 do série za sebou.

Každý integrovaný obvod má dvojici pinů pro komunikaci. Jedny piny slouží jako vstupní a druhá sada jako výstupní. Toto řešení umožňuje integrované obvody řadit za sebou, přestože každý z nich pracuje na odlišném napájecím napětí. V typickém zapojení je nejvyšší napětí spodního obvodu připojeno k nejnižšímu napětí obvodu horního. V tomto uspořádání master čte, nebo píše ze souboru sériově zapojených obvodů jako z dlouhého posuvného registru, v němž jsou uloženy hodnoty napětí jednotlivých bateriových článků.

#### **Fyzická vrstva**

Pro sériovou komunikaci je na obvodu připraveno sedm vývodů. Na straně nižšího napětí jsou piny CSBI, CSKI, SDI a SDO. Na straně vyššího napětí jsou piny CSBO, SCKO



a SDOI. CSBI a SCKI jsou vždy vstupy, řízené masterem, nebo jiným LTC6802 v případě, že jich je řazeno více v sérii. CSBO a SCKO jsou vždy výstupy, které řídí další integrovaný obvod v řadě. SDI je datový vstup, jestliže dochází k zapisování do řady sériově řazených obvodů. Jestliže probíhá čtení dat, plní pin SDI funkci výstupu. Obdobně pracuje i pin SDOI na výstupní straně obvodu LTC6802. Pin SDO je použit pouze u spodního, nejnižšího integrovaného obvodu, který je spojen s řídicím mikroprocesorem. Tento pin vyžaduje připojení pull-up odporu. U zbylých obvodů, které jsou řazeny za tímto nejspodnějším, již tento pin není využíván a lze ho tak připojit buďto k pinu V- nebo nechat nezapojen.

Pro komunikaci mezi sériově zapojenými obvody, se musejí příslušné piny připojit přes PN přechod. Ke komunikaci mezi obvody je využíváno dvoustavové změny proudu, nikoliv napětí. Volba mezi napěťovou a proudovou komunikací se provádí prostřednictvím pinu  $V_{MODE}$ . Obvod, který je připojen k řídicímu procesoru, tedy „bottom“, musí být nastaven na napěťovou komunikaci a musí tedy mít pin  $V_{MODE}$  nastaven na „high“. Toho se docílí propojením pinu  $V_{MODE}$  s pinem  $V_{REG}$ . Zbylé obvody v zapojení mají pin  $V_{MODE}$  připojen k pinu V-, čímž se dosáhne proudové komunikace. K označení posledního (top) integrovaného obvodu slouží pin TOS. Tento pin je potřeba u posledního obvodu v řetězci připojit k zemi.

### Linková vrstva

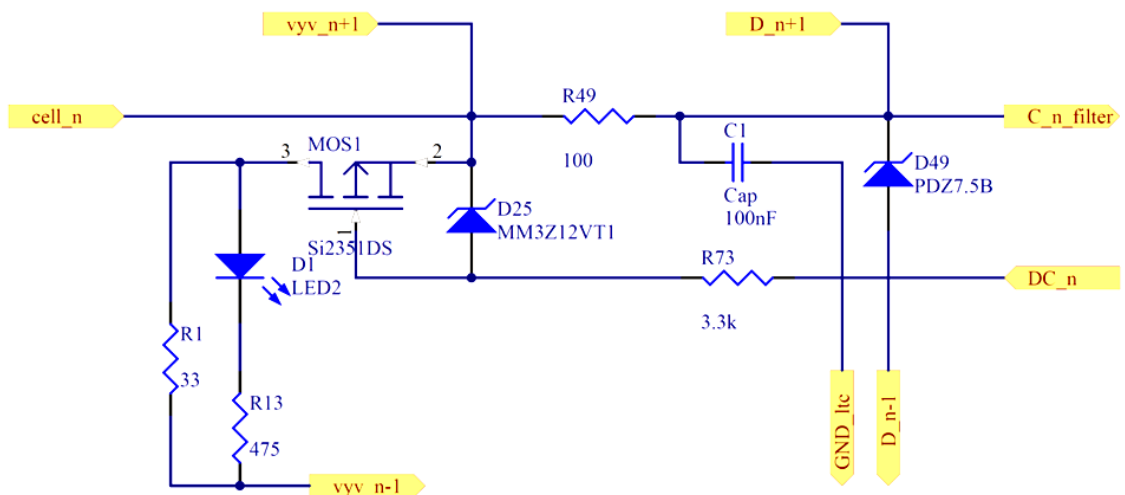
Polarita a fáze hodinového signálu: LTC6802 je kompatibilní s SPI sběrnici a dokáže pracovat v režimu  $C_{PHA}=1$  a  $C_{POL}=1$ , které definují vztah hodinového a datového signálu. Z toho vyplývá, že data na pinu SDI musejí být již v okamžiku nástupní hrany hodinového signálu.

Přenos dat: Každý byte se skládá z osmi bitů. V bytech je přenášen jako první nejvýznamnější bit (MSB). Data pro přijímání a vysílání musejí být na příslušných pinech (SDI, SDO) v okamžiku nástupní hrany hodinového signálu. K přechodovým stavům dochází během sestupné hrany hodinového signálu. Pin CSBI musí být stažen k nule po celou dobu přenosu dat. Frekvenci hodinového signálu udává řídicí procesor.

## Filtrování napětí na člancích

LTC6802 obsahuje A/D převodník, který dokáže vzorkovat signál o frekvenci maximálně 512kHz. Aby nedocházelo k antialiasingu, je vhodné na vstup převodníku umístit dolnofrekvenční propust s užitečným útlumem na 500kHz. Vstupní filtr je tedy navržěn tak, aby jeho zlomová frekvence byla 16 kHz. Přestože se jedná o filtr prvního řádu, má tento filtr na 500 kHz již dostatečný útlum 30 dB. Filtr tedy tvoří kombinace kondenzátoru 100 nF a odporu 100 Ω. Odpory o hodnotě 100 Ω mohou být vloženy do série se vstupem, aniž by ovlivnily měření napětí. Ovšem to pouze v případě že se k balancování využívá externích FET tranzistorů. Pro stabilizaci mohou být přidány také vyrovnávací kondenzátory, které se připojí mezi články baterie a V-, vytvoří se tak RC filtr. Důležitou poznámkou je, že toto zapojení nelze použít v případě, že se k balancování využívá pouze vnitřní tranzistor LTC6802.

RC filtr nemůže být použit u pinu V-, protože jakýkoliv odpor přidaný na výstupu obvodu vytvoří významnou chybu v měření hodnoty napětí prvního článku. Obvod je napájen z pinu V+, který je doporučováno připojit na vrchní článek přes oddělovací síť  $R=20\Omega$  a  $C=100nF$ .



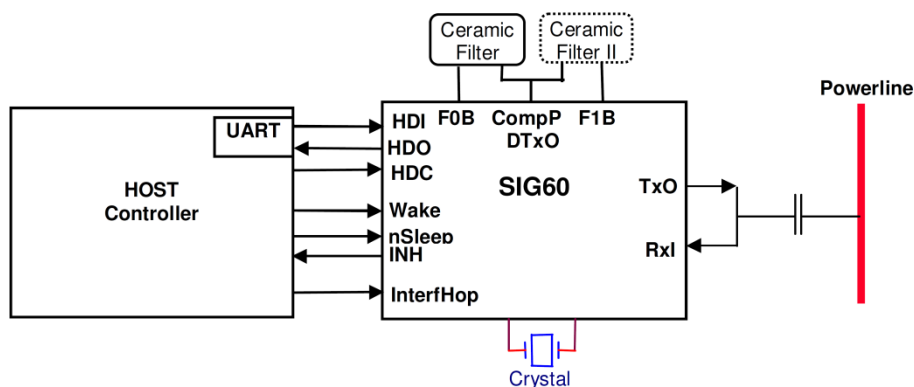
Obr. 16 Schéma obvodu připojeného mezi články baterie a LTC6802

## Čtení teploty z externích sond

Ke čtení jsou připraveny jednoúčelové piny  $V_{TEMP1}$  a  $V_{TEMP2}$ . Sondy mohou být napájeny pomocí pinu  $V_{REG}$ . Pro případ, kdy jsou použity čidla teploty, které potřebují ke své činnosti vyšší proud, než jaký dokáže pin  $V_{REG}$  dodat (1 mA) je potřeba doplnit zapojení o operační zesilovač, který senzorům zabezpečí dodávku dostatečného proudu.

### 3.4 SIG60

SIG60 je druhá generace obvodů určených pro digitální komunikaci prostřednictvím silových vodičů baterií, které jsou v anglické literatuře značeny jako „powerline“. Je tak umožněno tyto vodiče použít pro obojí, jak pro vedení elektrické energie, tak pro přenos zpráv. Dojde tak k minimalizaci materiálových nákladů na zařízení, protože není nutné vést odděleně vodiče pro komunikaci a vodiče pro vedení elektrického proudu. SIG60 používá unikátní kódování digitální informace, takže ji minimalizována možnost jejího zarušení v silových vodičích. Čip v sobě obsahuje velké množství součástek, které by byly pro tento účel zapotřebí. Pro minimalizaci spotřebovávané energie je možné uvést čip do „sleep“ modu a opět ho kdykoliv uvést do pohotovostního režimu. Údaje o obvodu, popsaném v této kapitole, jsou čerpány z jeho datasheetu. [17].



Obr. 17 Schéma komunikace mezi řídicím procesorem a silovými vodiči prostřednictvím SIG60 [17]

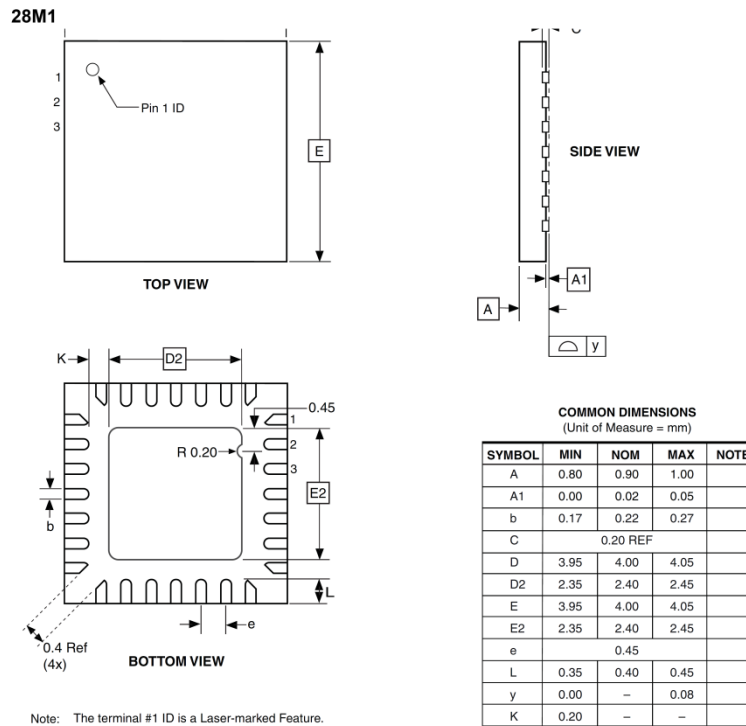
Tento obvod pracuje jako AC/DC vysílač/přijímač, který umožní z dané aplikace odstranit komunikace založené na RS232/ LIN. Dojde tak k eliminaci množství používaných vodičů. Přenosová rychlost až 115,2 Kbps plně nahrazuje LIN síť. Síť tvořená pomocí SIG60 se skládá z jednoho master SIG60, pomocí něhož je řízen zbytek obvodů SIG60, které tak pracují v režimu „slave“. V jedné síti může být ovšem více masterů, jestliže je využíván

multiplex. Dosáhne se toho tak, že každý SIG60, který je použit jako master, posílá svá data na odlišné frekvenci.

Integrované obvody byly od firmy YAMAR zaslány společně s dvěma kusy desky plošných spojů, keramickým filtrem nalazeným na 6,5 MHz, oscilátorem 4 MHz a schématem zapojení včetně hodnot zbylých součástek.

### 3.4.1 Přehled

#### Pouzdro



Obr. 18 Pouzdro 28 QFN a funkce jednotlivých pinů [18]

Pozn.:

1. InterfHop - automatická změna frekvence mezi F0 a F1 v případě že není detekován signál
- 2., 21 Gnd - zem
3. TxO - výstup na silové vodiče
4. RxN - vstup k negativnímu pinu vnitřního komparátoru
5. RxIn - přijímací vstup od silových vodičů k vnitřnímu komparátoru
- 6., 19. Vdd - napájení 3,3 V
7. Test - je připojen k zemi
8. RxOn - HIGH jestliže je zařízení přijímá informace
9. TxOn - HIGH jestliže zařízení vysílá
10. MF1nF0 - výstupní signál ukazuje na vybranou přenosovou frekvenci HIGH – F1, LOW – F2
11. Wake - slouží k probuzení zařízení ze sleep modu
12. nReset - vstup pro vyresetování zařízení
13. nSleep - po převedení úrovně LOW přejde zařízení do sleep modu
14. INH - ve sleep modu LOW v normal HIGH, slouží pro indikaci stavu zařízení, případně řízení napájení zařízení následujícím za SIG60 (HOST controller)
15. HDO - výstup demodulovaných dat přijatých ze silových vodičů
16. F1nF0 - výběr mezi frekvencemi F1 a F0 HIGH – F1, LOW – F0
17. HDC - data/command mode, jestliže je přivedena na pin úroveň LOW je umožněno číst a psát do vnitřních registrů SIG60, v normálním režimu HIGH
18. HDI - vstup dat, která budou následně modulována na silové vodiče
20. DTxO - modulovaný digitální přenosový signál – výstup pro oba keramické filtry
22. OscO - výstup pro oscilátor
23. OSCIn - vstup pro oscilátor
24. AGnd - analogová zem
25. F1B - externí filtr pro frekvenci F1
26. F0B - externí filtr pro frekvenci F0
27. AVdd - zdroj pro analog 3,3 V, odděleno od Vdd pomocí 10 Ω rezistoru a propojeno s Gnd pomocí 1 nF a 10 nF kondenzátorů
28. RxP - kladný pin komparátoru, propojen s RxN pomocí 1 kΩ odporu

## **Systém signalizace**

SIG60 využívá pro svoji komunikaci speciální signalizační nosnou, kterou lze odlišit od běžného šumu vznikajícího na silových vodičích. Přijímač přijme data ze zarušené linky a extrahuje je na jednotlivé bity. Na jedné síti může pracovat větší počet zařízení, každé ale musí pracovat na jiné z dostupných frekvencí. Další možností je přepínání frekvencí u jednoho zařízení, jestliže dochází k zarušování signálu na jedné frekvenci, může se přepnout na jinou přenosovou frekvenci, kde již mohou být podmínky příznivější.

## **Sít' a kanály**

Sít' může pracovat na šestnácti frekvenčních párech. Jestliže zařízení pracují jako pár, mohou pracovat vždy na dvou různých přednastavených frekvencích, které lze snadno přepínat.

Na každém kanálu je prováděn asynchronní přenos dat mezi jednotlivými zařízeními na výkonové lince. Zařízení umožňuje používat LIN protokol pro přenos dat. Přenos dat pomocí SIG60 je řízen pomocí host procesoru, který je připojen pomocí UART rozhraní.

## **LIN protokol**

Jedná se o protokol používaný pro sériovou komunikaci. Je často využíván pro komunikaci mezi jednotlivými komponenty v automobilech. Potřeba levnější komunikace mezi jednotlivými komponenty, než pomocí CAN sběrnice dávala vzniknout různým topologiím. To vedlo ke ztrátě kompatibility, protože různí automobiloví výrobci používali různé typy sériových komunikací. Z tohoto důvodu byly na konci 90. let položeny základy protokolu LIN (Local Interconnect Network). [19]

## **Protokol**

SIG60 může být používán v režimu master – slave s využitím síťového protokolu LIN, který je založen na principech UART protokolu. Zařízení obdrží asynchronní byte (jeden start bit a jeden stop bit). Jestliže provádí SIG60 přídavné obslužné rutiny pro síť, aplikační vrstvy, nebo řízení přenosových frekvencí, je stále dostupný pro řídicí zařízení.

## Řízení spotřeby

Sleep mode, do kterého je možno příslušný SIG60 uvést řídicím (master) prvkem, dokáže snížit spotřebu příslušného prvku tím, že deaktivuje některé z jeho vnitřních obvodů. Během „Sleep“ modu je zařízení periodicky zapínáno každých 32 mSec pro případ, že by mu byla zaslána zpráva, která ho uvádí zpět do pohotovostního režimu. Jestliže není detekována žádná aktivita, vrací se zařízení zpět do „sleep“ modu. Volba keramického filtru

SIG60 je navržen tak, aby dokázal přijímat a vysílat informace prostřednictvím jednoho filtru. Jestliže je ale u SIGu vyžadováno přepínání mezi dvěma komunikačními frekvencemi, je potřeba v návrhu počítat se dvěma keramickými filtry. Minimální možná šířka pásma je  $\pm 60$  kHz. Úzká šířka pásma limituje maximální přenosovou rychlost. Při výběru je tedy vhodné vybírat filtr s co nejširší šířkou pásma. Mezi komerčně dostupné filtry, které se dají pořídit, patří hodnoty 1,75 MHz, 10,5 MHz, 13 MHz.

## Komunikační výkon

Délka vodiče nemá na komunikaci takový vliv jako impedance a počet zařízení k vodiči připojených. SIG60 potřebuje alespoň signál s hodnotou 20 mVpp pro řádný příjem informace. Kvalitního přenosu je dosaženo, jestliže je vysílaný signál na přijímací straně vidět na osciloskopu bez přidaného šumu.

## Krystalový oscilátor

Obvod je navržen tak, aby mohl být zapojen s levným 4 MHz oscilátorem. Ten se připojí mezi OscIn a OscOut piny. Hodnoty kondenzátorů C1 a C2 závisí na doporučení výrobce oscilátoru. Zpravidla se pohybují mezi 0 pF a 1,5 pF.

### 3.4.2 Činnost

#### Konstrukce zprávy

SIG60 sestaví zprávu, která mu je zaslána prostřednictvím UART od jeho řídicího procesoru. Zpráva je desetibitová, začíná start bitem („low“), který signalizuje přenos a je zakončena stop bitem.

## Řízení obvodu SIG60

Režim provozu může být řízen a nastavován pomocí dvou kontrolních registrů, které SIG60 obsahuje. Základní hodnoty registrů po připojení k napájení jsou nastaveny na následující parametry:

- Přenosová rychlost - 19,2KB/s
- Přenosové frekvence
  - F0 – 5,5MHz
  - F1 – 6,5MHz

Přepisování hodnot nastavených v registrech umožňuje změnit frekvence a přenosovou rychlost. Také umožňuje aktivovat automatický přechod zařízení do „sleep“ modu a automatickou odpověď na přijaté bity.

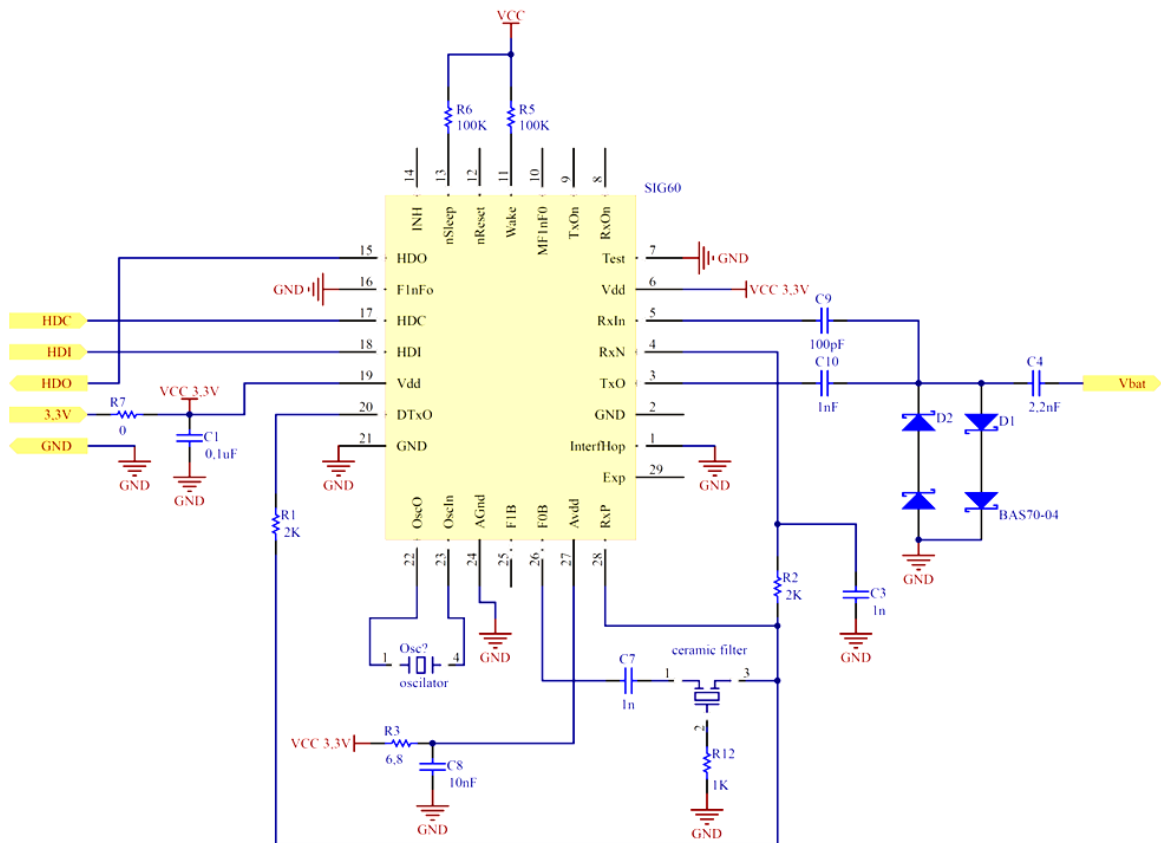
### Přenos

Jakmile je detekován start bit na HDI, SIG60 začne vysílat modulovaný signál o nastavené frekvenci a přenosové rychlosti na silové vodiče.

Jestliže zařízení nevysílá, poslouchá co se děje na silových vodičích. Detekuje a dekóduje signál, který mu určuje, na jaké frekvenci má poslouchat. Jestliže je ve „sleep“ modu, čeká na zprávu, která jej aktivuje.



### Schéma zapojení

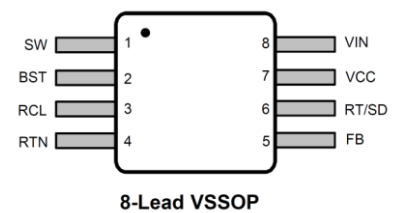


Obr. 19 Schéma zapojení obvodu SIG60

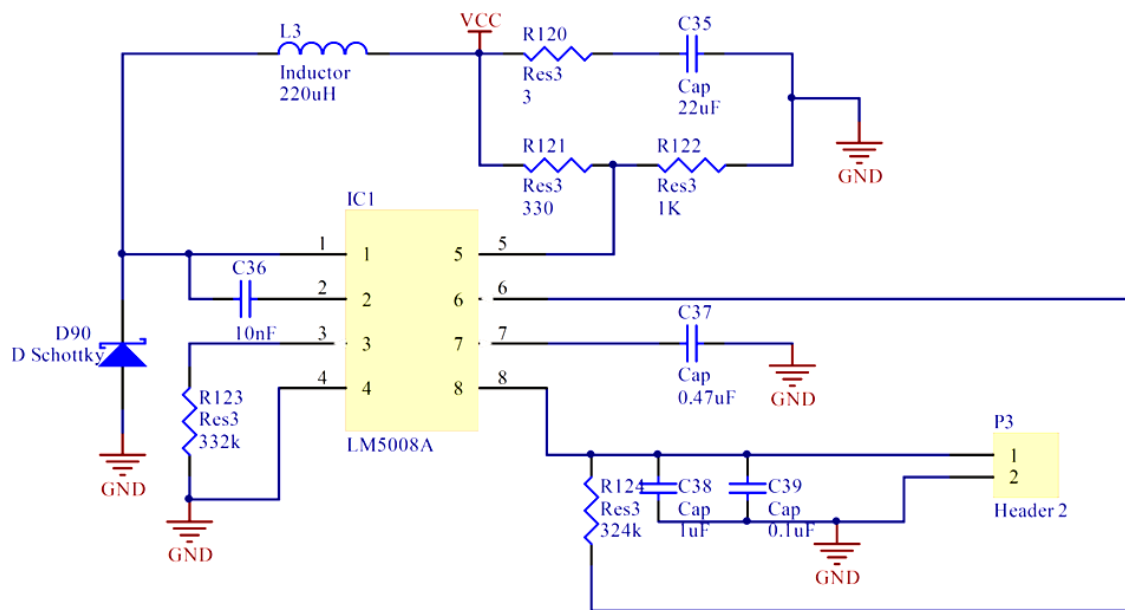
### 3.5 LM5008A

Jedná se o obvod se zabudovaným tranzistorem, který funguje jako pulzní regulátor napětí. Pro napájení obvodů SIG60 a procesoru MSP430 potřeba napětí 3,3V. Jelikož je celá deska pro battery management navrhována tak, aby jí bylo v budoucnu možno zapojit přímo na balancované články bez nutnosti přivedení externího zdroje napájení, bylo potřeba použít regulátor, který dokáže stabilizovat napětí na požadovanou hodnotu 3,3V, a to i v případě, že bude připojeno maximální množství balancovaných článků. Sériovým spojením článků vzniká napětí, které je již příliš vysoké pro klasické lineární stabilizátory.

LM5008A dokáže regulovat napětí od minimální hodnoty 2,5V a to až do maximální hodnoty napájecího napětí, které je 95V. Je tak třeba dbát pozornosti na to, aby celkové napětí článků nepřesáhlo tuto hodnotu. [20]



Obr. 20 Pouzdro obvodu LM5008A [20]



Obr. 21 Zapojení obvodu LM5008A

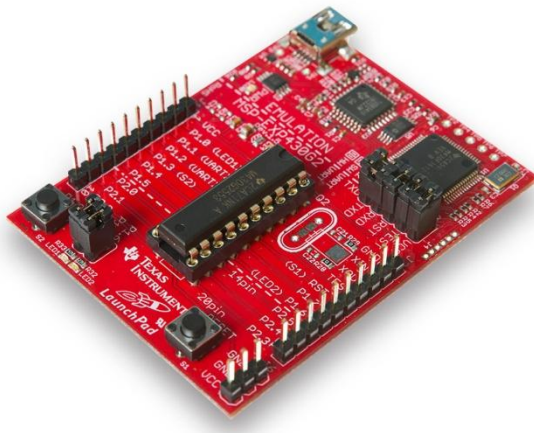
Hodnota výstupního napětí se nastavuje pomocí odporového děliče R121, R122, a to podle vzorce:

$$V_{OUT} = 2,5 \cdot (R_{121} + R_{122}) / R_{122} \quad (3.1)$$

Vstupní napětí obvodu LM5008A se nechá nastavit v rozmezí 6-95V. Obvod obsahuje integrovaný MOSFET tranzistor na 100V. Výhodou je integrované teplotní čidlo, které v případě přehřátí obvod odpojí. Pomocí externích komponent je možné nastavit dobu, po jejímž uplynutí dojde k opětovné aktivaci stabilizátoru. Dále je obvod vybaven vnitřní ochranou proti proudovému přetížení. [20]

Pro indikaci provozu zdroje byla na desku přidána zelená dioda předřadným odporem.

### 3.6 MSP-EXP430G2



Obr. 22 MSP-EXP430G2 [21]

Pro řízení obvodu LTC6802 byl vybrán vývojový kit MSP-EXP430G LaunchPad od firmy Texas Instrument, který obsahuje procesor MSP430G2553IN20. Tento kit obsahuje vše, co je potřeba pro řízení obvodu určeného pro balancování baterií a komunikaci s obvodem SIG60. Disponuje dostatečným množstvím vývodů, které jsou potřeba pro sériovou komunikaci se zbylými částmi navrhované desky. [21]

Procesor vyše prostřednictvím SPI sběrnice příkaz obvodu LTC6802, ve kterém bude žádat hodnoty napětí na jednotlivých člancích baterie. Na tento příkaz LTC6802 zareaguje a odešle zpět data získaná pomocí A/D převodníku. Po přijetí dat vyhodnotí řídicí procesor článek s nejvyšším napětím. Na tomto článku je potřeba napětí snížit pomocí vybíjecího rezistoru. Proto procesor vyše LTC6802 příkaz, ve kterém určí, na jakém článku má být sepnut tranzistor s vybíjecím odporem. K tomuto účelu slouží řídicí registry integrovaného obvodu, do kterých se napětí naměřené na jednotlivých člancích dále pošle prostřednictvím UART integrovanému obvodu SIG60, který je namoduluje na silové vodiče.

Propojení vývojového kitu se zbylými částmi obvodu je následující:

MSP430G2553 >>> LTC6802

PIN6 UCB0STE >>>	SBI	
PIN14 UCB0SOMI	>>>	SDO
PIN15 UCB0SIMO	>>>	SDI
PIN7 UCB0CLK	>>>	SCKI

MSP430G2553 >>> SIG60

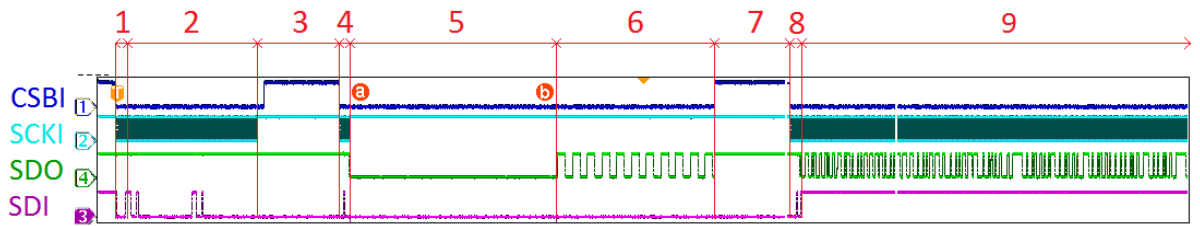
PIN3 UCA0RXD	>>>	HDO
PIN4 UCA0TXD	>>>	HDI
PIN8 GPIO	>>>	HDC (Data/Command)

Napětí, při kterém je potřeba články balancovat se liší s typem Lithium-iontové baterie, která bude balancována. Zpravidla je toto napětí 4,2 V, ale například LFP baterie mají hraniční napětí již 3,6 V. Je tedy potřeba při programování znát parametry článku, který bude v budoucnu použit. Pro experimentální ověření funkce byly Li-Ion články nahrazeny rezistory v sériovém zapojení napájené ze stabilizovaného zdroje. Napěťový úbytek na jednotlivých rezistorech simuluje napětí jednotlivých článků. [16,21]

## 4 Implementace programu a ověření funkčnosti

Pro ověření funkčnosti obvodu byl sestrojen program, který přenastaví vnitřní registry obvodu LTC6802 tak, aby bylo možné měřit napětí jednotlivých článků. Je tedy nutné nastavit CDC bity z hodnoty 0, která je defaultní, na hodnotu 1 – 7. Následně je poslán příkaz pro převod napětí a uložení naměřených hodnot do registrů integrovaného obvodu. Ukončení převodu je signalizováno změnou hodnoty o frekvenci 1 kHz (toggle polling) na pinu SDO obvodu LTC6802. Poté lze již zadat příkaz pro čtení hodnot registru, ve kterém jsou naměřené hodnoty uloženy. Frekvenci a počet pulzů hodinového signálu určuje řídicí procesor. Je tedy nutné poslat takový počet hodinových pulzů, kolik je čteno bitů. Po celou dobu odesílání příkazů a následného čtení je nutné mít aktivovaný CSBI pin (chip select). Mezi jednotlivými příkazy musí být toto stažení přerušeno, dojde tak k rozeznání dvou, po sobě následujících, příkazů. Procesor lze řídit prostřednictvím UART, kdy je propojen procesor MSP430G2 s počítačem pomocí USB. Osobní počítač tak v tomto případě slouží pouze jako terminál pro zadávání a čtení dat z procesoru, který má na starost řízení procesu balancování článků. V obou případech dojde k převodu napětí na člancích a odeslání hodnoty zpět na UART. Druhou možností jak získat údaj u napětí článků je stisknutím tlačítka, které je umístěno přímo na vývojovém kitu. To je naprogramováno tak, aby po jeho stisku došlo k převodu napětí jednotlivých článků a odeslání hodnot prostřednictvím UART do osobního počítače, který slouží jako terminál.

Na navržené desce jsou umístěny dva LTC6802, to znamená, že jak při zápisu do registrů, tak při jejich čtení se musí počítat s dvojnásobkem bitů, než by bylo potřeba pro obvod s jedním LTC6802. Tomu musí odpovídat i množství hodinových pulzů, které složí pro synchronizaci signálu.



Obr. 23 Schéma přenosu

Pozn.:

- CSBI – chip select
- SCKI – hodinový vstup
- SDO – výstup dat z LTC6802
- SDI – datový vstup do LTC6802
- 1 – WRCFG – příkaz pro zápis do konfiguračního registru
- 2 – zápis jednotlivých bitů do konfiguračního registru pro první a následně druhý obvod LTC6802
- 3 – pauza před dalším příkazem
- 4 – STCVAD – příkaz pro A/D převod napětí článku, dojde k uložení hodnot do vnitřních registrů
- 5 – zařízení je zaneprázdněno převodem – signalizováno stažením SDO pinu k nule
- 6 – toggle polling – signalizuje ukončení A/D převodu
- 7 – pauza před dalším příkazem
- 8 – RDCV – příkaz pro odeslání hodnot registrů s převedenými hodnotami napětí
- 9 – LTC6802 odesílá jednotlivé bity z registru naměřeného napětí, nejprve odešle spodní, poté horní obvod

Po ověření funkčnosti komunikace prostřednictvím SPI mezi procesorem a obvodem LTC6802 bylo přistoupeno k ověření funkčnosti přenosu informace prostřednictvím vodičů primárně určených pro vedení elektrického proudu baterie. K navrhované desce byl připojen obvod SIG60 a osciloskopem byl snímán průběh výstupního signálu, který je veden prostřednictvím silových vodičů. Na přijímací straně byl umístěn druhý modul s obvodem SIG60 a na jeho výstupu byl opět naměřen, pomocí osciloskopu, signál totožného průběhu, jako na straně vysílací. K vyslání příkazu pro převod napětí článků a odeslání naměřených hodnot prostřednictvím silových vodičů bylo naprogramováno tlačítko na vývojovém kitu. Na následujícím grafu je vidět průběh napětí na silových vodičích v porovnání s daty, které obvod SIG60 přijímá. Na osciloskopu lze odečíst, že frekvence modulovaného signálu je 6,5 MHz.



Obr. 24 Průběh modulovaného signálu na napětí baterií

Pozn.:

- CH1 – průběh vysílaného signálu na obvod SIG60
- CH2 – průběh signálu za obvodem SIG60 na přijímací straně
- CH3 – výstupní signál z LTC6802, komunikace SPI (odeslání příkazu > převod > toggle polling > odeslání naměřených dat)
- CH4 - průběh modulovaného signálu – osciloskop v režimu AC pro měření střídavé složky

## Závěr

V současné době se hledá způsob, jak co nejefektivněji skladovat elektrickou energii, kterou by bylo možné v pozdější době využít. Jedna z možností, jak tuto energii uložit, je skladování prostřednictvím elektrochemických článků. I tento způsob skladování elektrické energie se neustále vyvíjí a přináší nové technologie a materiály. Jednou z nejmodernějších technologií jsou Lithium-iontové baterie, které mají velice vysokou hustotu skladované energie, nízké samovybíjení proudy a neprojevuje se u nich paměťový efekt. Na rozdíl od ostatních elektrochemických zdrojů, jsou ale velice náchylné na přebíjení a přetěžování vysokými proudy. Z tohoto důvodu je potřeba bateriový „pack“ doplnit vhodným systémem řízení baterie.

Současný rozvoj dopravní techniky, která pro svůj pohon využívá elektrické energie, jde ruku v ruce s rozvojem akumulátorů, na jejichž kapacitě stojí dojezd elektrického vozidla. Zbývající dojezd vozidla je velice důležitý údaj, o kterém by měl mít jeho řidič co nejpřesnější údaj. Dojezd vozidla se odvíjí od zbývající energie uložené v bateriích. Proto je vhodné, aby dokázaly baterie co nejvíce energie pojmout. Nesprávné zacházení s baterií, příliš hluboké vybíjení, či naopak přebíjení způsobuje rychlejší snižování její kapacity. Z tohoto důvodu je vhodné mít stále aktuální údaj o napětí jednotlivých článků. Proto systém řízení baterie odesílá naměřené hodnoty napětí nadřazené řídicí jednotce, která sbírá hodnoty od všech článků baterií instalovaných ve vozidle. To ovšem přináší nutnost přivedení dalších vodičů ke každému BMS, prostřednictvím nichž tato komunikace probíhá. Při použití komunikace modulované a vyslané na silové vodiče, které jsou k baterii připojeny a primárně určeny pro vedení trakčního proudu, je nutnost přivedení dalších vodičů odstraněna.

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a sestrojít vzorek, který má za úkol ověřit funkčnost a realizovatelnost této myšlenky. Jako příklad funkčnosti navrženého obvodu bylo provedeno měření napětí na člancích a odeslání hodnoty prvního změřeného článku prostřednictvím obvodu SIG60 prostřednictvím silových vodičů na druhý obvod s integrovaným obvodem SIG60, který zprávu opět dekódoval. Zároveň lze prostřednictvím silových vodičů zadávat příkaz pro měření napětí na člancích a výpis konfiguračního registru.



Díky použití mikroprocesoru a komunikaci prostřednictvím silových vodičů je umožněna velká variabilita celého systému a záleží na nápaditosti programátora, jaký software navrhne a co přesně bude od LTC6802 vyžadovat.

Řídicí program může na základě naměřených napětí vyhodnotit článek s nejvyšším napětím a zápisem do registru zajistit sepnutí příslušného balancovacího rezistoru. Tím by se dosáhlo rovnoměrného rozložení napětí na jednotlivých člancích.

SIG60 je navržen pro komunikaci paralelně řazených zdrojů a spotřebičů, avšak pro trakční účely je zapotřebí komunikovat mezi bateriemi zapojenými do série. Doporučení pro další postup je tedy ověření, zda namodulovaný signál bude schopen projít skrz další sériově připojenou baterii. Schopnost signálu projít bude ovlivněna impedancí článku pro modulační frekvenci, která je v tomto případě 6,5 MHz. Jestliže by docházelo k přílišnému útlumu signálu, mohl by být každý článek přemostěn keramickým (rychlým) kondenzátorem, který by propustil modulační frekvenci, ale stejnosměrný proud baterie by skrz něj neprošel.

Mezi další návrhy na zlepšení by bylo vhodné zařadit úpravu spínaného zdroje tak, aby dokázal stabilizovat napětí na hodnotu 3,3 V i z maximální hodnoty 120 V, kterou je možno připojit k obvodům LTC6802. Došlo by tak k plnému využití napěťového rozsahu těchto obvodů.

## Seznam obrázků

Obr. 1 Vlastnosti LCO baterie .....	17
Obr. 2 Vlastnosti LMO baterie .....	18
Obr. 3 Vlastnosti LFP baterie .....	19
Obr. 4 Vlastnosti NMC baterie .....	19
Obr. 5 Vlastnosti NCA baterie .....	20
Obr. 6 Vlastnosti LTO baterie] .....	20
Obr. 7 Měrná kapacita akumulátorů elektrické energie .....	22
Obr. 8 Průběh SOC, napětí a proudu .....	23
Obr.9 Pasivní vyvažování vybitím v závislosti na napětí.....	27
Obr. 10 Pasivní balancování článků baterie.....	28
Obr. 11 Příklady aktivního balancování článků s využitím kapacitorů a cívek .....	29
Obr. 12 Blokové schéma zařízení .....	31
Obr. 13 3D zobrazení desky s plošnými spoji v programu Altium Designer.....	33
Obr. 14 Pouzdro LTC6802 .....	34
Obr. 15 Detekce nepřipojeného vstupu .....	35
Obr. 16 Schéma obvodu připojeného mezi článek baterie a LTC6802.....	42
Obr. 17 Schéma komunikace mezi řídicím procesorem a silovými vodiči prostřednictvím SIG60 .....	43
Obr. 18 Pouzdro 28 QFN a funkce jednotlivých pinů .....	45
Obr. 19 Schéma zapojení obvodu SIG60.....	49
Obr. 20 Pouzdro obvodu LM5008A .....	49
Obr. 21 Zapojení obvodu LM5008A .....	50
Obr. 22 MSP-EXP430G2 .....	51
Obr. 23 Schéma přenosu .....	54
Obr. 24 Průběh modulovaného signálu na napětí baterií .....	55

## **Seznam tabulek**

Tab. 1 Porovnání vlastností různých druhů baterií .....	<b>13</b>
Tab. 2 Zkratky používané pro různé druhy Li-ion baterií.....	<b>21</b>
Tab. 3 Provozní parametry Li-ion baterií.....	<b>21</b>
Tab. 4 SOC v závislosti na napětí a době dobíjení článku.....	<b>24</b>

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Jak aktivně pečovat o Li-Ion články. *HW* [online]. 2009 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/jak-aktivne-pecovat-o-li-ion-clanky.html>
- [2] Roots of the Lithium Battery Problem: Berkeley Lab Researchers Find Dendrites Start Below the Surface. *Berkeley Lab* [online]. 2013 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z: <http://newscenter.lbl.gov/science-shortcuts/2013/12/17/roots-of-the-lithium-battery/>
- [3] ANDREA, Davide. *Battery management systems for large lithium-ion battery packs* [online]. Boston: Artech House, c2010, xi, 290 p. [cit. 2013-12-16]. ISBN 16-080-7104-9.
- [4] Lithium Ion Battery Advantages & Disadvantages. *Radio-Electronics* [online]. [cit. 2013-12-20]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/info/power-management/battery-technology/lithium-ion-battery-advantages-disadvantages.php>
- [5] Lithium-based Batteries. *Battery University* [online]. 2013 [cit. 2014-01-10]. Dostupné z: [http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium\\_based\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries)
- [6] Battery knowledge. *Advanced Battery Systems* [online]. [cit. 2014-01-10]. Dostupné z: <http://www.advanced-battery.com/batteryknowledge.html>
- [7] What's the Best Battery?. *Battery University* [online]. 2010 [cit. 2014-01-10]. Dostupné z: [http://batteryuniversity.com/learn/article/whats\\_the\\_best\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_best_battery)
- [8] Energy Content of Selected Fuels. *Are we toast?* [online]. [cit. 2014-02-11]. Dostupné z: <http://arewetoast.com/energy-content-of-selected-fuels.html>
- [9] Is Lithium-ion the Ideal Battery?. *Battery University* [online]. 2010 [cit. 2014-02-08]. Dostupné z: [http://batteryuniversity.com/learn/article/is\\_lithium\\_ion\\_the\\_ideal\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/article/is_lithium_ion_the_ideal_battery)
- [10] What is the C-rate?. *Battery University* [online]. 2011 [cit. 2014-02-15]. Dostupné z: [http://batteryuniversity.com/learn/article/what\\_is\\_the\\_c\\_rate](http://batteryuniversity.com/learn/article/what_is_the_c_rate)
- [11] Types of Lithium-ion. *Battery University* [online]. 2011 [cit. 2014-03-20]. Dostupné z: [http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion)
- [12] LTO Batteries. *AA Portable Power Corp.* [online]. 2009 [cit. 2014-03-16]. Dostupné z: <http://www.batteryspace.com/Lithium-Titanate-Battery.aspx>
- [13] Charging Lithium-ion. *Battery University* [online]. 2010 [cit. 2014-04-20]. Dostupné z: [http://batteryuniversity.com/learn/article/charging\\_lithium\\_ion\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_batteries)
- [14] DAOWD, Mohamed, Noshin OMAR, Peter VAN DEN BOSSCHE a Joeri VAN MIERLO. Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation. *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* [online]. IEEE,

- 2011, s. 1-7 [cit. 2013-12-18]. DOI: 10.1109/VPPC.2011.6043010. Dostupné z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6043010>
- [15] *2009 9th International Conference on Electronic Measurement* [online]. IEEE, 2009 [cit. 2013-12-18]. Dostupné z:  
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5274520>
- [16] dokumentace k obvodu LTC6802 od firmy Linear Technology [online]. [cit. 2013-10-15] dostupné z <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/68021fa.pdf>
- [17] dokumentace k obvodu SIG60 od firmy Yamar [online]. [cit. 2013-11-04] dostupné z <http://www.yamar.com/datasheet/DS-SIG60.pdf>
- [18] dokumentace k mikrokontroleru ATmega48 od firmy Atmel [online]. [cit. 2014-04-18] dostupné z <http://www.farnell.com/datasheets/1693866.pdf>
- [19] Introduction to the Local Interconnect Network (LIN) Bus. *National Instruments* [online]. 2011 [cit. 2014-02-01]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/9733/en/>
- [20] dokumentace k obvodu LM5008A od firmy Texas Instruments [online]. [cit. 2013-11-05] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm5008a.pdf>
- [21] dokumentace k vývojovému kitu MSP EXP430G2 od firmy Texas Instruments [online]. [cit. 2013-12-11] dostupné z <http://www.ti.com/tool/msp-exp430g2>
- [22] Li-S. *Oxis energy* [online]. [cit. 2014-04-25]. Dostupné z:  
<http://www.oxisenergy.com/technology>
- [23] The ultra-high volumetric energy density lithium-sulfur battery. *Phys* [online]. 2014 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: <http://phys.org/news/2014-01-ultra-high-volumetric-energy-density-lithium-sulfur.html>

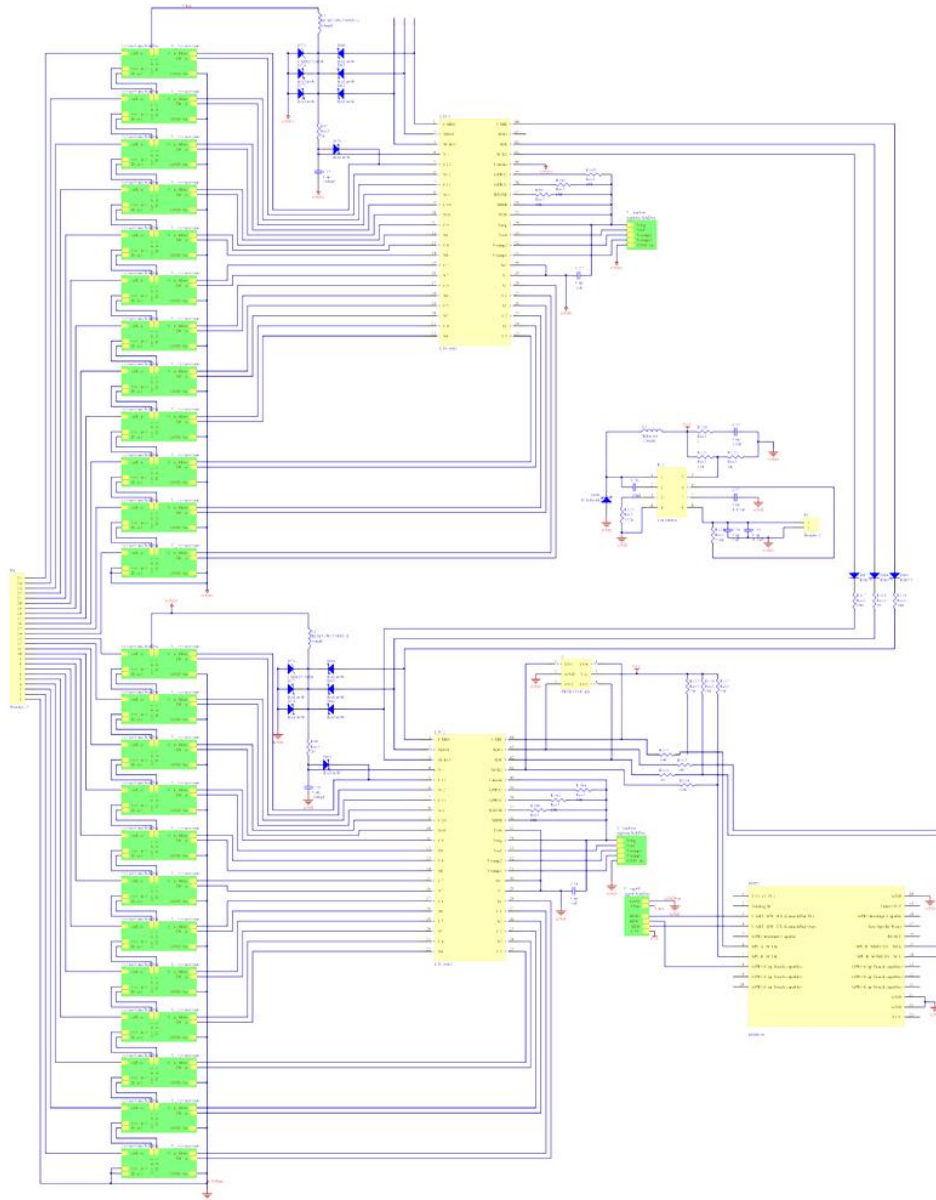
## Přílohy

### Příloha č.1 - Seznam součástek

název	hodnota	obj. číslo	počet	poznámka
hlavní deska				
R1-R12, R25-R36	33 Ω	2079038	24	RESISTOR, ANTI SULPHUR, 2010, 33R
R13-R24, R37-R48	475 Ω	1470018	24	RESISTOR, 1206, 475R, 1%
R49-R72, R108, R110-R115, R117, R119, R128	100 Ω	2008392	34	RESISTOR, 1206, 100R, 1%, 1/4W
R73-R96	3300 Ω	2333568	24	RESISTOR THICK FILM, 3.3KOHM, 1%, 1206
R97, R98, R116, R118	20 Ω	2057800	4	RESISTOR, 1206, 20R 5%, 0.25W
R99-R127	1 MΩ	2333552	9	RESISTOR THICK FILM, 1MOHM, 1%, 1206
R105-R107, R109	10 kΩ	2333546	4	RESISTOR THICK FILM, 10KOHM, 5%, 1206
R120	3 Ω	1892993	1	RESISTOR, 1206, 3R, 1%, 0.33W
R121	330 Ω	2333536	1	RESISTOR THICK FILM, 330 OHM, 1%, 1206
R122	1000 Ω	2333539	1	RESISTOR THICK FILM, 1KOHM, 5%, 1206
R123	332 kΩ	2081984	1	RESISTORS GLUEABLE CHIP, 1206, 330K
R124	324 kΩ	1858265	1	RESISTOR, 1206, 324K, 0.1%
C1-C26, C39	100 nF	2332842	27	CAP, MLCC, X7R, 100NF, 100V, 1206
C27-C30, C38	1 μF	2112837	5	CAP, MLCC, X7R, 1UF, 100V, 1206
C31-C34, C36	10 nF	2332841	5	CAP, MLCC, X7R, 10NF, 100V, 1206
C35	22 μF	2332888	1	CAP, MLCC, X7R, 22UF, 6.3V, 1206
C37	0,47 μF	1789746	1	CAP, MLCC, X8L, 470NF, 50V, 1206
D1-D24, D91	LED Yellow	2322089	25	LED, 1206, YELLOW, 120MCD, 590NM
D25-D48	BZT52C12S	1466027	24	DIODE, ZENER, 0.2W, SOD-323
D49-72	TDZ7V5J	2069522	24	DIODE, ZENER, 0.500W, 7V5V, SOD323F
D73, D76	BZT52H	1757813	2	DIODE, ZENER, 0.375W, 62V, SOD123F
D74, D75, D77-D86	BAT46W	1858621	12	DIODE, SCHOTTKY, 0.2W, 100V, SOD-123
D87-D89	RS07J	1864882	3	DIODE, SWITCH, 600V, 0.5A.DO-219AB
L1, L2	WE-CBF SMD	1635739		FERRITE BEAD, 0.2 OHM, 0.5A, 1206
PRTR5V0U4D	PRTR5V0U4D	1757869	1	DIODE, ESD, USB, 8KV, 1PF, SOT457
LT6004	LT6004	2294691	2	OP AMP, DUAL, 2MHZ, 0.0008V/US, 8MSOP
MOS 1 - 24	SI2351DS	1838998	24	MOSFET,P CH,20V,2.8A,SOT23-3

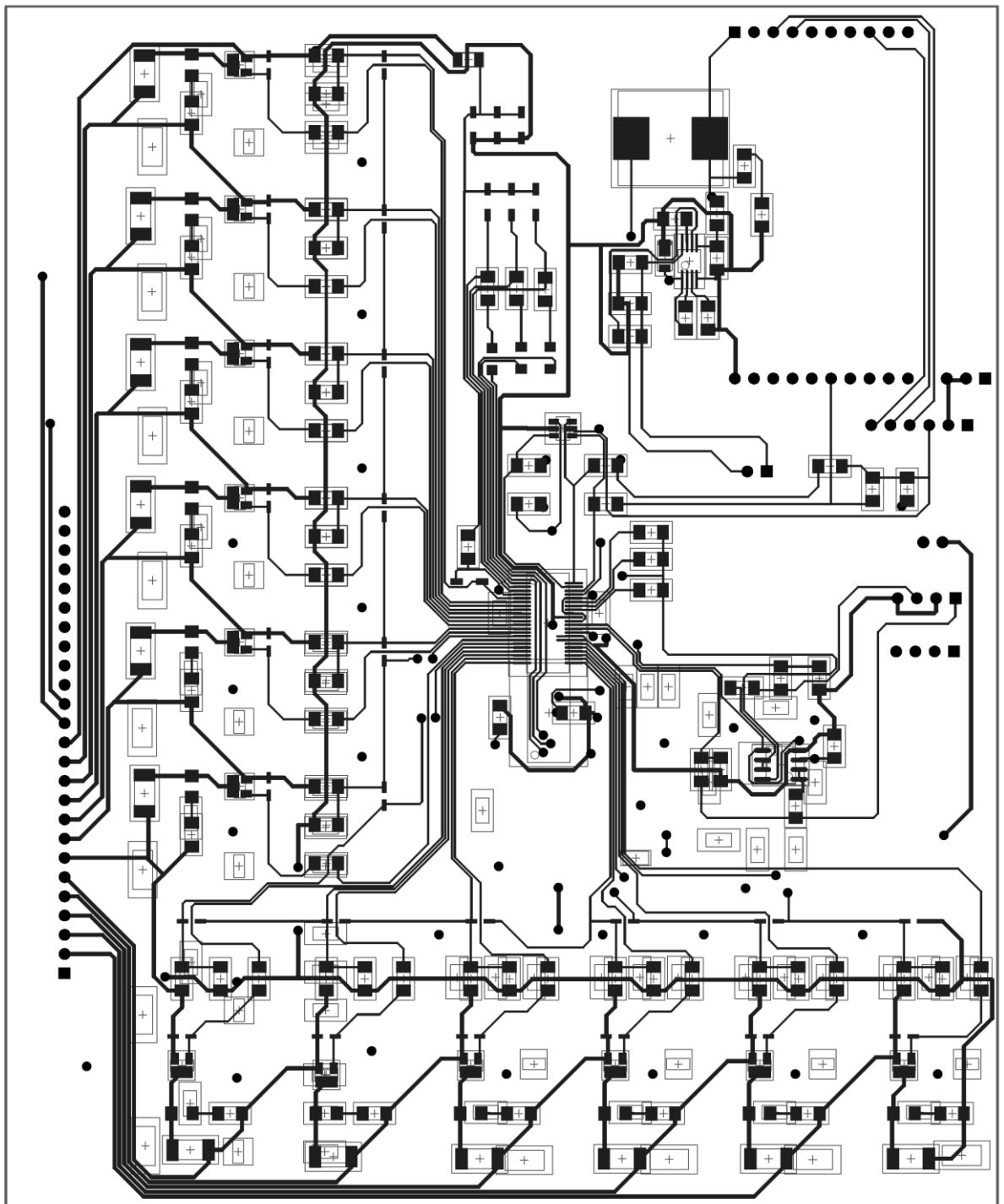
název	hodnota	obj. číslo	počet	poznámka
IC1	LM5008A	2112610	1	BUCK, 95VIN, 0.35A, ADJ, 8MSOP
L3	DR125-221-R	2075601	1	INDUCTOR, SMD, 220UH, 1.19A
D90	DFLS1100-7	1713889	1	RECTIFIER STD RECOVERY POWERDI 123
NTC čidla	10k	GES	2	
SIG60				
pozn.: Uveden počet součástek pro jedno zařízení, pro příjem a vysílání je potřeba zařízení dvou				
R1, R2	2 k $\Omega$	1160154	2	RESISTOR, 0805, 2K
R3	6,8 $\Omega$	2081905	2	RESISTOR, 0805, 6R8
R5, R6	100 k $\Omega$	2333538	2	RESISTOR THICK FILM, 100KOHM, 1%, 0805
R12	1 k $\Omega$	1652936	1	RESISTOR, 0805, 1K
C4	2,2 nF/200V	1284151	1	CAP, MLCC, X7R, 2.2NF, 200V, 1206
C1	0,1 $\mu$ F	1650863	1	CAP, MLCC, X7R, 100NF, 25V, 0805
C9	100 pF	1650857	1	CAP, MLCC, C0G/NP0, 100PF, 50V, 0805
C8	10 nF	1612187	1	CAP, MLCC, X7R, 10NF, 25V, 0805
C3, C7, C10	1 nF	2332783	3	CAP, MLCC, X7R, 1NF, 50V, 0805
D1, D2	BAS70-04	1612354	2	DIODE, SMALL SIGNAL, 70V, SOT-23
krystalový oscilátor 4MHz		objednáno ze stránek yamar.com	1	4MHz, THT
keramický filtr 6,5MHz			1	6,5MHz, THT
sig60			1	28 lead QFN

## Příloha č. 2 - Kompletní schéma zapojení

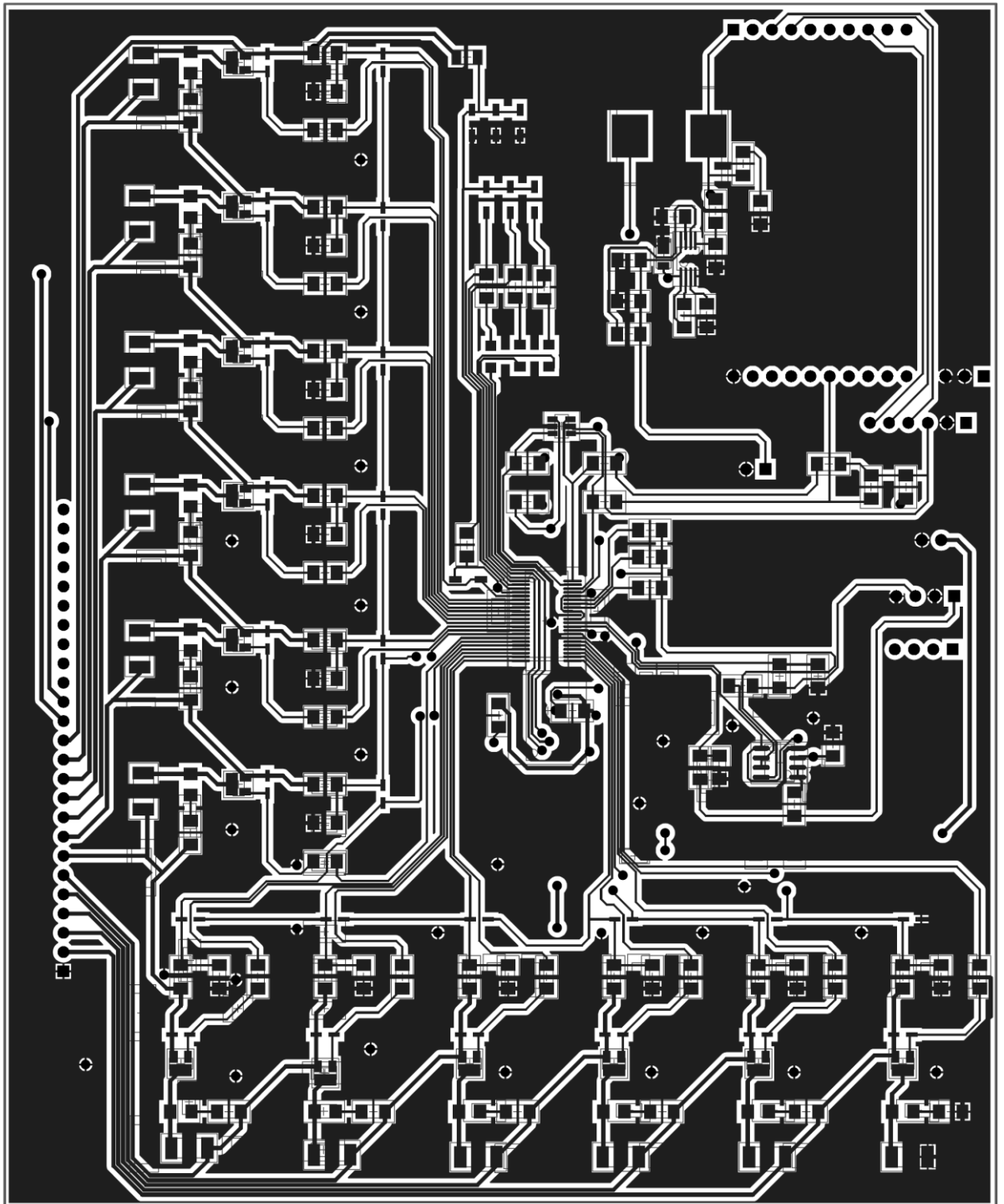




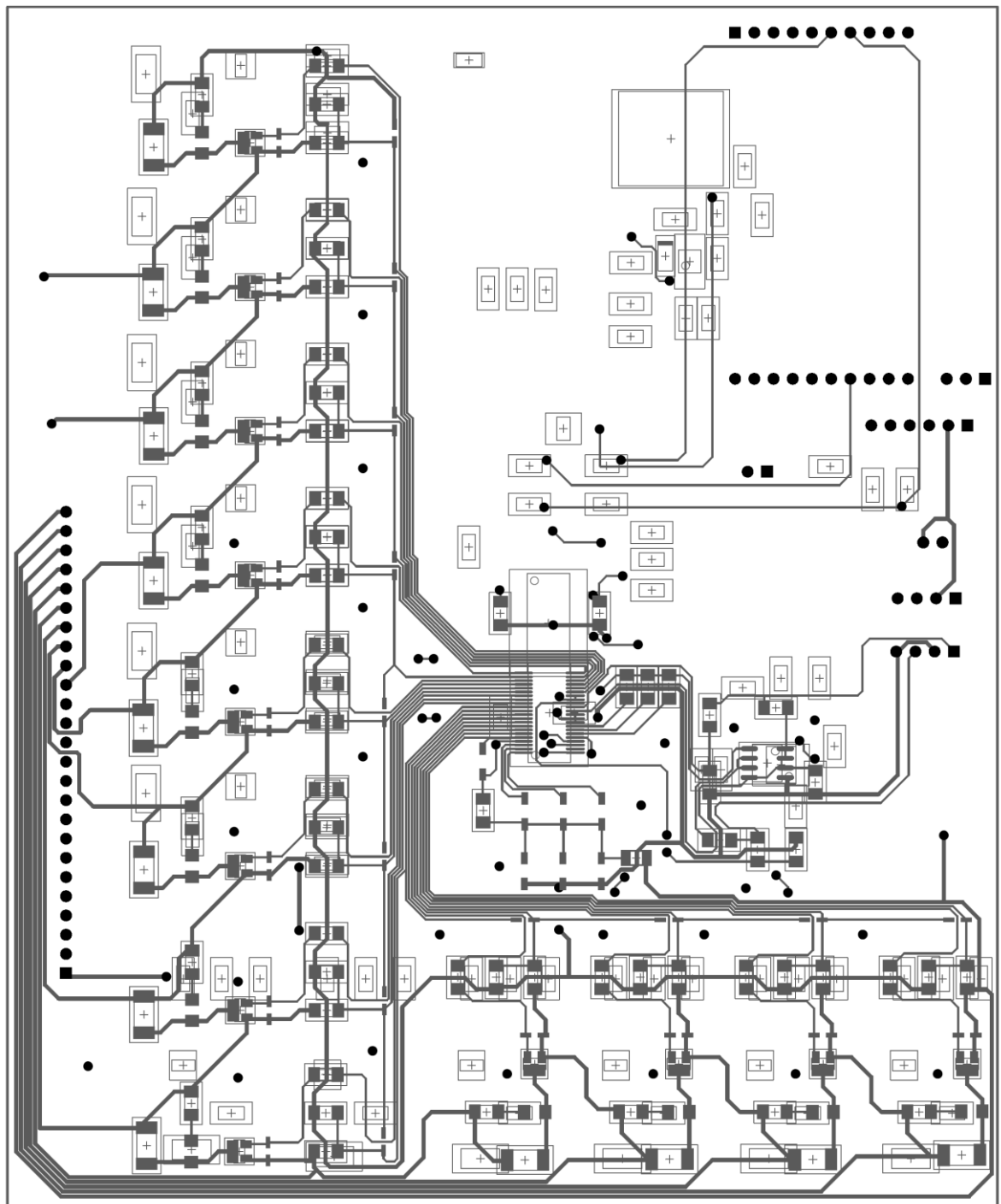
**Příloha č. 3 - Horní vrstva spojů bez polynomu**



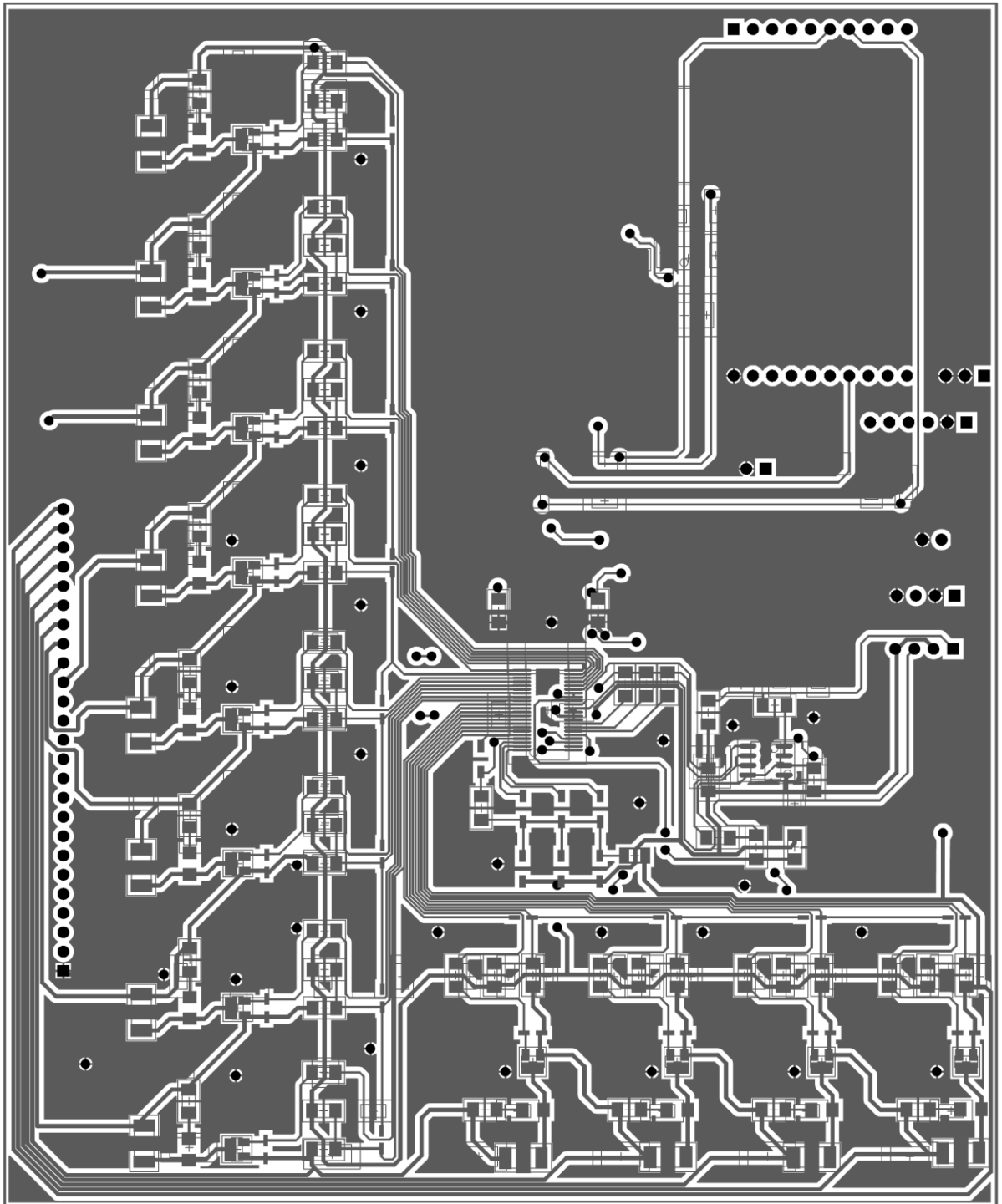
**Příloha č. 4 - Horní vrstva spojů s polynomem**



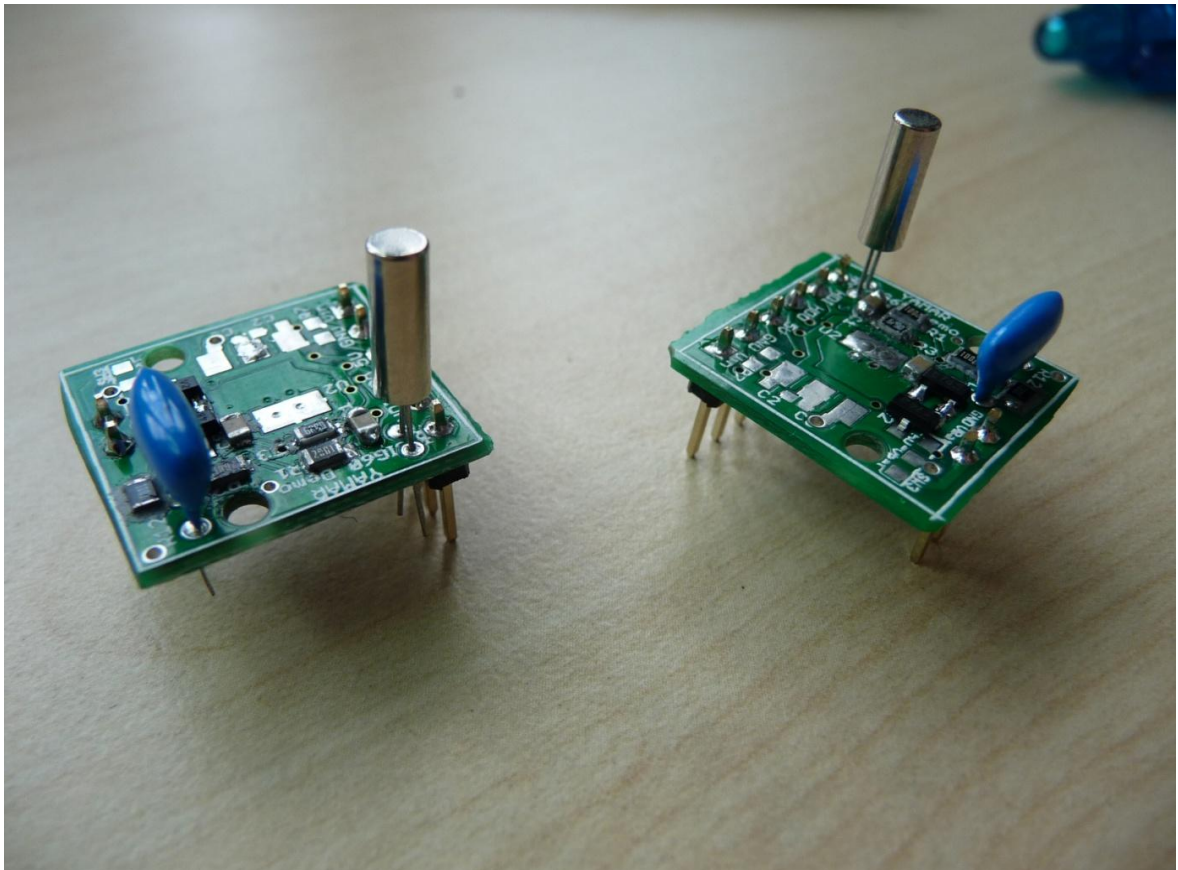
**Příloha č. 5 - Spodní vrstva spojů bez polynomu**



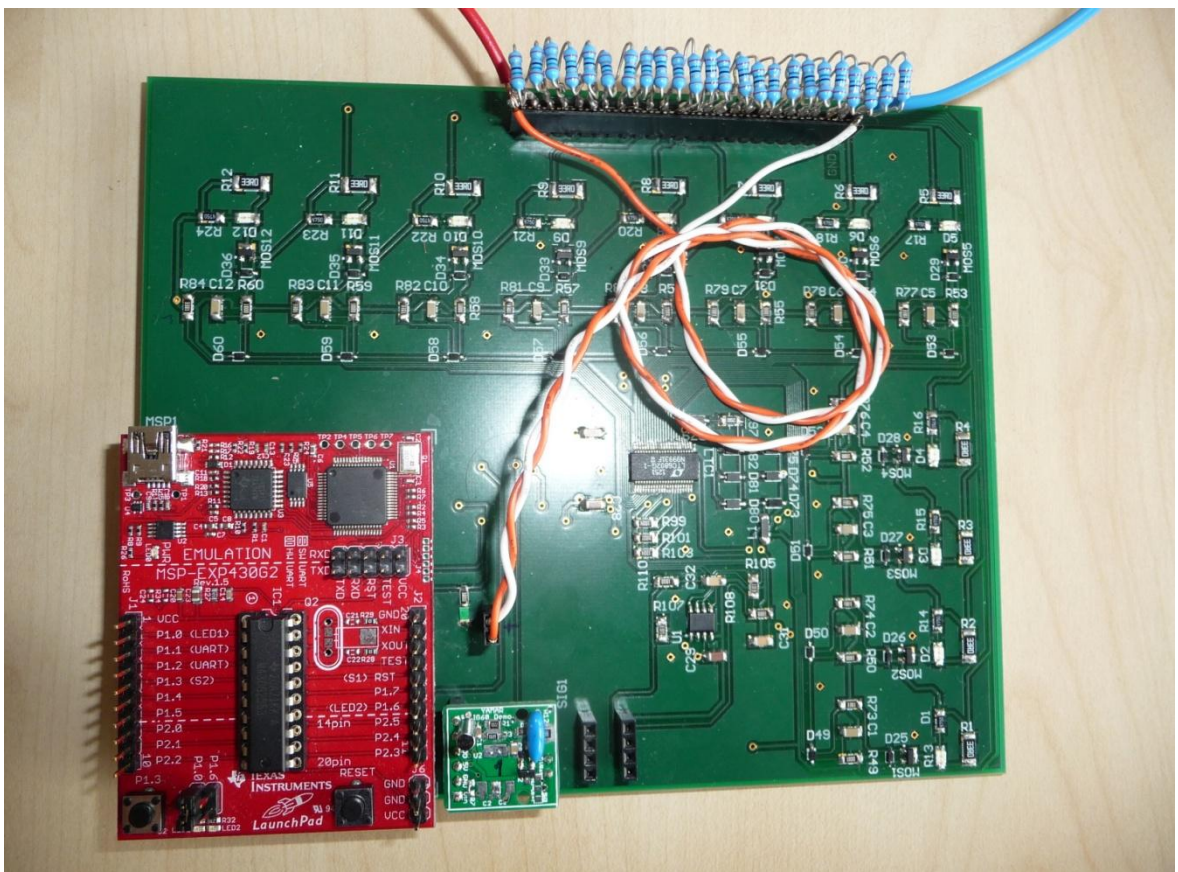
**Příloha č. 6 - Spodní vrstva spojů s polynomem**



**Příloha č. 7 – Osazená deska plošných spojů s obvodem SIG60**

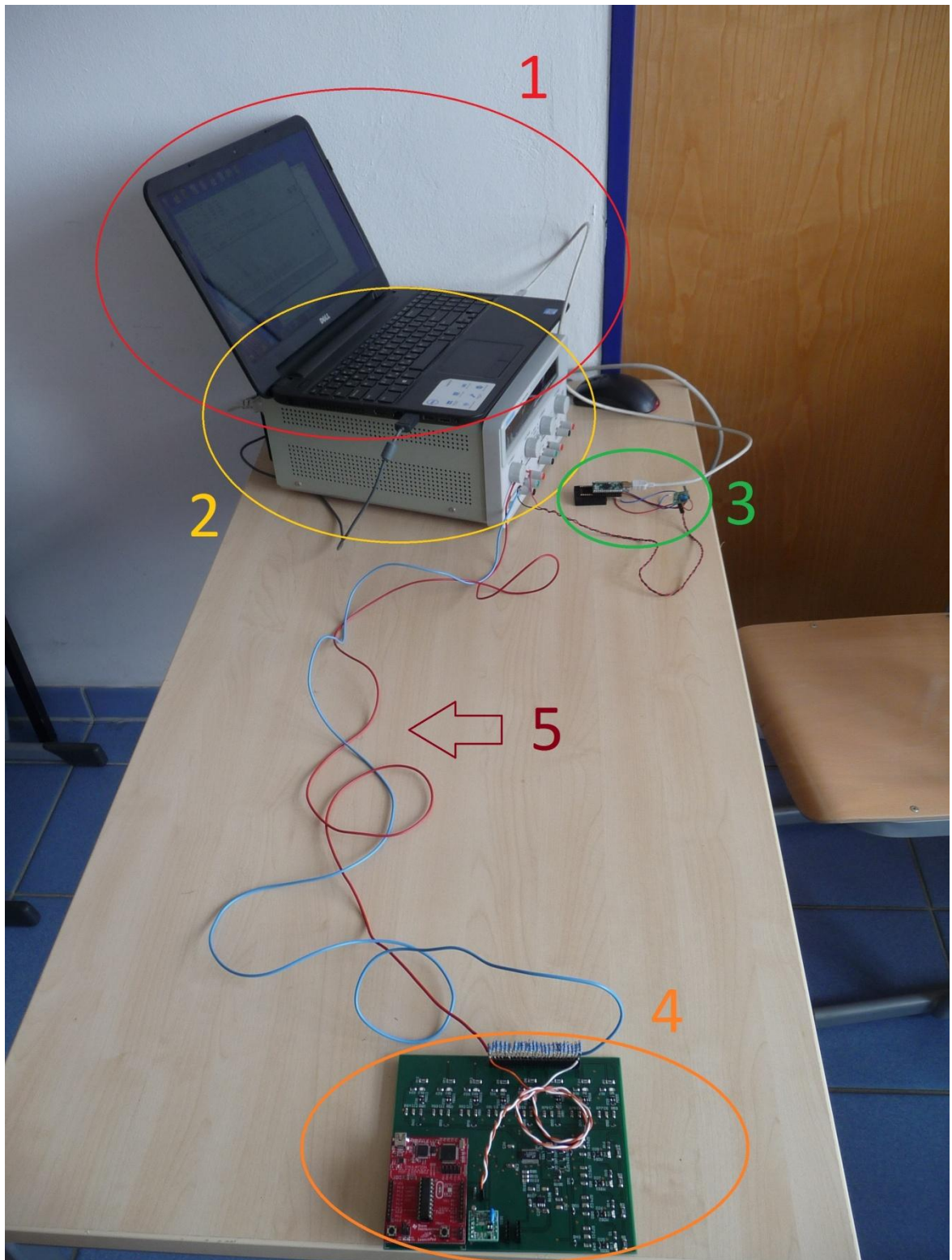


**Příloha č. 8 – Osazená deska plošných spojů s obvody LTC6802**





**Příloha č. 9 – Kompletní zapojení pro komunikaci prostřednictvím silových vodičů**



- 1 – osobní počítač sloužící jako terminál
- 2 – laboratorní zdroj napětí, který společně s odporovou sítí simuluje jednotlivé bateriové články
- 3 – SIG60 na straně terminálu + UM232H modul USB – UART
- 4 – navrhovaná deska s řídicím procesorem a obvodem SIG60
- 5 – silové vodiče