

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh systému pro řízení akumulátorů (BMS)**

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

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miroslav TYRPEKL**  
Osobní číslo: **E16N0030K**  
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Návrh systému pro řízení akumulátorů (BMS)**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Uveďte základní principy a vlastnosti řízení nabíjení a vybíjení akumulátorových baterií.
2. Proveďte analýzu akumulátorových baterií a na jejím základě vyberte vhodný typ akumulátorů.
3. Navrhněte obvodové řešení systému pro řízení akumulátorových baterií.
4. Podle návrhu vyrobte prototyp.
5. Oživte prototyp a zhodnoťte dosažené parametry systému. Případně uveďte možnosti dalšího vylepšení či rozšíření.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Bedřich Bednář**  
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **30. května 2019**

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



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2018

## **Abstrakt**

Diplomová práce je zaměřena na návrh systému pro řízení akumulátorů. Práce se v první části zabývá druhy akumulátorů, a výběrem vhodného typu. V druhé části je práce zaměřena na bateriový management. V této kapitole je popis bateriového management systému, jeho rozdělení a funkce. Další kapitola je zaměřena na návrh systému pro řízení akumulátorů. Návrh obsahuje aktivní i pasivní vyvažování akumulátorů. Je rozdělen na tři desky plošných spojů, které jsou vzájemně propojeny. Poslední kapitola diplomové práce je věnovaná testování systému. Kde jsou rozebrány chyby návrhu, jeho vylepšení a testování balancérů.

## **Klíčová slova**

BMS, LTC, ISL, akumulátory, aktivní a pasivní balancování, mikrokontrolér, nadřazený systém, komunikace.

## **Abstract**

The thesis is focused on the design of a battery control system. The first part of the work deals with the types of batteries, and the choice of the appropriate type. The second part is focused on battery management. This chapter describes the battery management system, its division and functions. Next chapter is focused on the design of the battery control system. The design includes both active and passive battery balancing. It is divided into three printed circuit boards that are interconnected. Last chapter of the thesis is devoted to system testing where design errors, design improvements and balancer testing are discussed.

## **Key words**

BMS, LTC, ISL, accumulators, active and passive balancing, microcontroller, superior system, communication.

## 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 27.5.2019

Bc. Miroslav Tyrpekl

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Bedřichu Bednáři za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Janu Benešovi a Ing. Petru Vavrochovi za pomoc se softwarem.

# Obsah

<b>OBSAH.....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>12</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>13</b>
<b>1 AKUMULÁTOROVÉ BATERIE.....</b>	<b>14</b>
1.1 TYPY AKUMULÁTORŮ.....	14
1.1.1 Olověné akumulátory .....	15
1.1.2 NiCd akumulátory.....	15
1.1.3 NiMH akumulátory.....	16
1.1.4 Lithiové akumulátory.....	17
1.1.4.1 Li-Ion.....	17
1.1.4.2 Li-Pol.....	18
1.1.4.3 LiFePO <sub>4</sub> .....	19
1.1.4.4 HE3DA.....	19
1.2 VELIČINY A VLASTNOSTI AKUMULÁTOROVÝCH ČLÁNKŮ.....	20
1.3 VÝBĚR AKUMULÁTOROVÝCH ČLÁNKŮ .....	21
<b>2 BATERIOVÝ MANAGEMENT.....</b>	<b>22</b>
2.1 ROZDĚLENÍ BMS .....	22
2.2 KLÍČOVÉ POŽADAVKY NA BMS .....	22
2.2.1 Stav nabití (SoC).....	23
2.2.2 Hloubka vybití (DoD).....	23
2.2.3 Zdravotní stav akumulátoru (SoH).....	23
2.2.4 Nabíjecí a vybíjecí proudy .....	24
2.2.5 Provozní teploty .....	24
2.3 BATERIOVÝ MANAGEMENT .....	24
2.3.1 Pasivní BMS.....	25
2.3.2 Aktivní BMS.....	25
2.3.2.1 Kapacitní balancéry.....	26
2.3.2.2 Induktivní balancéry.....	27
2.4 VÝBĚR TYPU BALANCÉRU.....	28
<b>3 NÁVRH SYSTÉMU PRO ŘÍZENÍ VYVAŽOVÁNÍ AKUMULÁTORŮ.....</b>	<b>29</b>
3.1 DESKA PLOŠNÉHO SPOJE BMS_P.....	30
3.1.1 Blokový diagram BMS_P.....	31
3.1.2 Integrovaný obvod ISL94212.....	32
3.1.2.1 Vnitřní struktura obvodu ISL94212.....	33
3.1.2.2 Typické zapojení obvodu ISL .....	33
3.1.2.3 Výkonové tranzistory .....	35
3.1.2.4 Diagnostika rozpojených cest.....	35
3.1.2.5 Měření napětí během balancování .....	35
3.1.2.6 Externí vstupy .....	36
3.1.3 Napájení systému .....	36
3.1.3.1 Zdroj napětí +12V .....	36
3.1.3.2 Zdroj napětí +5V .....	37
3.1.3.3 Zdroj napětí +3V3 .....	38
3.1.4 Mikrokontrolér.....	38
3.1.4.1 Blokované zapojení mikrokontroléru .....	39
3.1.4.2 Zapojení mikrokontroléru.....	40
3.1.5 EEPROM.....	41
3.1.6 Měření veličin .....	42



3.1.6.1	Měření napětí .....	42
3.1.6.2	Měření proudu.....	42
3.1.6.3	Měření teplot.....	43
3.1.7	<i>Nabíjení a vybíjení</i> .....	43
3.1.8	<i>Ovládání ventilátorů</i> .....	43
3.1.9	<i>Obvod TPL5110</i> .....	44
3.2	DESKA PLOŠNÉHO SPOJE BMS_A.....	45
3.2.1	<i>Integrovaný obvod LTC3300</i> .....	46
3.2.2	<i>Balancovací obvod</i> .....	47
3.3	DESKA PLOŠNÉHO SPOJE DOK .....	49
3.3.1	<i>Blokový diagram jednotky DOK</i> .....	49
3.3.2	<i>Napájení</i> .....	50
3.3.2.1	Napájení systému .....	50
3.3.2.2	Napájení CAN komunikace .....	51
3.3.3	<i>Ovládání</i> .....	51
3.3.4	<i>Displej</i> .....	51
3.3.5	<i>Mikrokontrolér</i> .....	52
3.3.5.1	Zapojení mikrokontroléru .....	52
3.3.6	<i>Komunikace s dalším systémem</i> .....	53
3.3.6.1	CAN komunikace .....	54
3.3.6.2	USB komunikace.....	55
3.3.6.3	LOOP obvod .....	56
3.4	DRUHY PROVOZNÍCH REŽIMŮ.....	57
3.4.1	<i>Skladový režim</i> .....	57
3.4.2	<i>Testovací režim</i> .....	58
3.4.3	<i>Běžný provoz</i> .....	59
<b>4</b>	<b>TESTOVÁNÍ NÁVRHU BMS A AKUMULÁTORŮ.....</b>	<b>61</b>
4.1	CHYBY PŘI NÁVRHU .....	61
4.2	VYLEPŠENÍ NÁVRHU .....	63
4.3	TESTOVÁNÍ BALANCÉRŮ.....	63
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>71</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>73</b>

## Seznam symbolů a zkratk

<i>BMS</i> .....	Battery Management System. (Systém pro řízení akumulátorů)
<i>HW</i> .....	Hardware
<i>SW</i> .....	Software
<i>NiCd</i> .....	Nikl-Kadmiové akumulátory
<i>NiMH</i> .....	Nikl-Metal-Hydridové akumulátory
<i>Li-Ion</i> .....	Lithiu-iontové akumulátory
<i>Li-Pol</i> .....	Lithiu-Polymerové akumulátory
<i>LiFePO<sub>4</sub></i> .....	Lithium-Železo-Fosfátové akumulátory
<i>HE3DA</i> .....	HE3DA akumulátory
$U_N$ .....	Jmenovité napětí [V]
$C_N$ .....	Jmenovitá kapacita [Ah]
<i>NTC</i> .....	Negativní termistor [ $\Omega$ ]
<i>SoC</i> .....	State of Charge (Stav nabití) [Ah, %]
<i>DoD</i> .....	Depth of Discharge (Hloubka vybití) [Ah, %]
<i>Q</i> .....	Aktuální kapacita akumulátoru [Ah]
<i>Q<sub>c</sub></i> .....	Celková kapacita akumulátoru [Ah]
<i>SoC<sub>0</sub></i> .....	Odhad stavu nabití v čase $t = 0$ [Ah, %]
<i>i(t)</i> .....	Proud dodaný do akumulátoru v čase $t$ [A]
<i>I<sub>batt</sub></i> .....	Proud dodaný do akumulátoru [A]
<i>I<sub>loss</sub></i> .....	Proud odebraný z akumulátoru [A]
$t_0$ .....	Čas na začátku měření [s]
$t$ .....	Čas v průběhu měření [s]
$\eta$ .....	Účinnost [%]
<i>SoH</i> .....	State of Health (Zdravotní stav akumulátoru) [%]
<i>Aku-pack</i> .....	Více akumulátorů zapojených v jednom systému
<i>N</i> .....	Počet akumulátorů [-]
<i>Buck-Boost</i> .....	Snižovací a zvyšovací měnič
<i>Flayback</i> .....	Blokující měnič
<i>DPS</i> .....	Deska Plošný Spojů
<i>DIN</i> .....	Deutsches Institut Normung
<i>BMS_P</i> .....	Deska s pasivním balancováním
<i>BMS_A</i> .....	Deska s aktivním balancováním

<i>DOK</i> .....	Deska určená na komunikaci a zobrazení
<i>DC/DC</i> .....	Stejnoseměrný zdroj napětí
<i>SPI</i> .....	Serial Peripheral Interface (seriová periferní komunikace)
<i>ADC</i> .....	Analog to Digital Converter (analogově digitální převodník)
<i>EEPROM</i> .....	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory (elektronicky mazatelná paměť pouze pro čtení)
<i>VCO-VC12</i> .....	Vstupy pro měření napětí u obvodu ISL
<i>CBO-CB12</i> .....	Výstupy pro řízení externích tranzistorů u obvodu ISL
<i>U<sub>DS</sub></i> .....	Napětí na MOSFET tranzistoru mezi drainem a sourcem
<i>U<sub>GS</sub></i> .....	Napětí na MOSFET tranzistoru mezi gatem a sourcem
<i>+12V</i> .....	Digitální napájení +5V [V]
<i>+5 V</i> .....	Digitální napájení +5V [V]
<i>+3V3</i> .....	Digitální napájení +3V3 [V]
<i>CAN</i> .....	Controller Area Network (datová sběrnice místní sítě)
<i>CPU</i> .....	Central Processing Unit (centrální procesorová jednotka)
<i>GPIO</i> .....	General Purpose Input/Output (univerzální vstupy a výstupy)
<i>RAM</i> .....	Random Access Memory (paměť s náhodným přístupem)
<i>UART</i> .....	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter (Univerzální asynchronní přijímač a vysílač)
<i>USB</i> .....	Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)
<i>PWM</i> .....	Pulse Width Modulation (pulzně šířková modulace)
<i>VCC</i> .....	Napájecí napětí [V]
<i>GND</i> .....	Uzemnění
<i>WiFi</i> .....	Wireless Fidelity (bezdrátový přenos dat)
<i>RGB</i> .....	Red Green Blue (barvy červená, zelená a modrá)
<i>ESD</i> .....	ElectroStatic Discharge (elektrostatické výboje)

## Seznam obrázků

OBR. 1.1 OLOVĚNÝ AKUMULÁTOR [PŘEVZATO 3].....	15
OBR. 1.2 NiCd AKUMULÁTOR [PŘEVZATO 4] .....	16
OBR. 1.3 NiMH AKUMULÁTOR [PŘEVZATO 5] .....	16
OBR. 1.4 LITHIOVÝ AKUMULÁTOR [PŘEVZATO 7] .....	17
OBR. 1.5 LI-ION AKUMULÁTOR [PŘEVZATO 8].....	18
OBR. 1.6 LI-POL AKUMULÁTOR [PŘEVZATO 9] .....	18
OBR. 1.7 LiFePO4 AKUMULÁTORY [PŘEVZATO 10].....	19
OBR. 1.8 HE3DA SLOŽENÍ [PŘEVZATO 11] .....	20
OBR. 1.9 HE3DA AKUMULÁTOR [PŘEVZATO 12].....	20
OBR. 2.1 PASIVNÍ VYVAŽOVÁNÍ [PŘEVZATO 16].....	25
OBR. 2.2 AKTIVNÍ VYVAŽOVÁNÍ POMOCÍ KONDENZÁTORŮ [PŘEVZATO 18].....	27
OBR. 2.3 AKTIVNÍ VYVAŽOVÁNÍ POMOCÍ TRANSFORMÁTORU [PŘEVZATO 19, 31] .....	28
OBR. 3.1 ROZDĚLENÍ SYSTÉMU NA JEDNOTLIVÉ DPS.....	29
OBR. 3.2 JEDNOTKA BMS_P .....	30
OBR. 3.3 BLOKOVÝ DIAGRAM BMS_P.....	31
OBR. 3.4 VNITŘNÍ STRUKTURA OBVODU ISL94212 [PŘEVZATO 20].....	33
OBR. 3.5 DOPORUČENÉ ZAPOJENÍ OBVODU ISL PRO 12 AKUMULÁTORŮ [PŘEVZATO 20].....	34
OBR. 3.6 TYPICKÉ ZAPOJENÍ EXTERNÍCH SOUČÁSTEK [PŘEVZATO 20].....	35
OBR. 3.7 TYPICKÉ ZAPOJENÍ MĚŘENÍ TEPLoty [PŘEVZATO 20].....	36
OBR. 3.8 TYPICKÉ ZAPOJENÍ REGULÁTORU LM46002 [PŘEVZATO 21] .....	37
OBR. 3.9 TYPICKÉ ZAPOJENÍ REGULÁTORU LM53600 [PŘEVZATO 22] .....	38
OBR. 3.10 BLOKOVÉ ZAPOJENÍ MIKROKONTROLÉRU STM32F446 [PŘEVZATO 23] .....	39
OBR. 3.11 ZAPOJENÍ MIKROKONTROLÉRU STM32F446 NA DESCE BMS_P.....	40
OBR. 3.12 BLOKOVÉ ZAPOJENÍ PAMĚTI M95M02 [PŘEVZATO 24] .....	41
OBR. 3.13 ZAPOJENÍ DVOU MOSFET TRANZISTORŮ PROTI SOBĚ [PŘEVZATO 25].....	43
OBR. 3.14 ZAPOJENÍ VENTILÁTORŮ S HLÍDÁNÍM OTÁČEK [PŘEVZATO 26] .....	44
OBR. 3.15 ZAPOJENÍ VENTILÁTORŮ S HLÍDÁNÍM OTÁČEK A ŘÍZENÍM POMOCÍ PWM [PŘEVZATO 26] .....	44
OBR. 3.16 ZAPOJENÍ TPL5110 [PŘEVZATO 27].....	45
OBR. 3.17 JEDNOTKA BMS_A.....	45
OBR. 3.18 PŘIPOJENÍ TŘÍ AŽ ŠESTI ČLÁNKŮ [PŘEVZATO 28].....	46
OBR. 3.19 VNITŘNÍ ZAPOJENÍ OBVODU LTC3300 [PŘEVZATO 28] .....	47
OBR. 3.20 ZAPOJENÍ AKTIVNÍHO BALANCOVACÍHO OBVODU [PŘEVZATO 28] .....	48
OBR. 3.21 JEDNOTKA DOK .....	49
OBR. 3.22 BLOKOVÝ DIAGRAM JEDNOTKY DOK .....	50
OBR. 3.23 ZAPOJENÍ DISPLEJE EADOGM132-5 [PŘEVZATO 31] .....	52
OBR. 3.24 ZAPOJENÍ MIKROKONTROLÉRU STM32F446 NA DESCE DOK .....	53
OBR. 3.25 VNITŘNÍ STRUKTURA BUDIČE ISO1050 PRO CAN BUS KOMUNIKACI [PŘEVZATO 32] .....	54
OBR. 3.26 ZAPOJENÍ PŘEVODNÍKU FT230X [PŘEVZATO 33] .....	55
OBR. 3.27 VNITŘNÍ ZAPOJENÍ OBVODU ADUM3160 [PŘEVZATO 34].....	56
OBR. 3.28 ZAPOJENÍ OPTOČLENU TYPY PS2801 A JEHO PRŮBĚHY [PŘEVZATO 35].....	56
OBR. 3.29 SKLADOVÝ REŽIM.....	58
OBR. 3.30 TESTOVACÍ REŽIM.....	59
OBR. 4.1 NÁVRH SYSTÉMU PRO ŘÍZENÍ AKUMULÁTORŮ - POHLED ZE SHORA.....	62
OBR. 4.2 NÁVRH SYSTÉMU PRO ŘÍZENÍ AKUMULÁTORŮ - POHLED ZE STRANY .....	62
OBR. 4.3 NABÍJENÍ A VYBÍJENÍ AKUMULÁTORŮ TYPY LiFePO4 [PŘEVZATO 36] .....	64
OBR. 4.4 CYKlicky SE NABÍJEJÍCÍCH 8 AKUMULÁTORŮ - 1.FÁZE.....	64
OBR. 4.5 CYKlicky SE NABÍJEJÍCÍCH 8 AKUMULÁTORŮ - 2.FÁZE.....	65
OBR. 4.6 CYKlicky SE NABÍJEJÍCÍCH 8 AKUMULÁTORŮ - 3.FÁZE.....	65
OBR. 4.7 KOMUNIKACE SPI MEZI MIKROKONTROLÉREM STM32 A LTC OBVODEM .....	66
OBR. 4.8 ASYNCHRONNÍ VYBÍJENÍ ČLÁNKU ČÍSLO 1 .....	67
OBR. 4.9 SYNCHRONNÍ VYBÍJENÍ ČLÁNKU ČÍSLO 1 .....	67
OBR. 4.10 NABÍJENÍ ČLÁNKU ČÍSLO 1 .....	68
OBR. 4.11 TESTOVÁNÍ CELÉHO SYSTÉMU BMS .....	68

## Úvod

V dnešní době velkého zájmu o soběstačnost a energetickou nezávislost na dodávkách elektrické energie se rozvíjí takzvané bateriové úložiště. Úložiště slouží k ukládání elektrické energie například z fotovoltaických panelů do bateriových článků. Uživatel chce mít pochopitelně životnost celého systému na zálohování elektrické energie co nejdéle. Největší slabina tohoto systému bývá zpravidla životnost akumulátorů. Vzhledem k rostoucím nárokům na jejich životnost je nutné články účinně řídit. Pro zvýšení životnosti se používá takzvaný systém pro řízení akumulátorů, zkráceně *BMS* (Battery Management System). V dnešní době je mnoho výrobců, kteří řízení integrují do malých integrovaných čipů. Ty jsou obvykle vybaveny komunikací pro nadřazený systém. Integrované obvody se většinou používají pro řízení více článků.

Diplomová práce se zabývá problematikou spojenou s řízením akumulátorů. V první řadě je potřeba vybrat vhodný typ akumulátorů pro bateriové úložiště. Po vybrání je potřeba zvolit typ balancéru pro konkrétní aplikaci. Poté je možno přejít k návrhu a realizaci *BMS*. Je nutno dodat, že tato diplomová práce se nezabývá softwarem, ale pouze hardwarovým návrhem. V další kapitole budou ukázané režimy, v jakých návrh může pracovat. Na konci této diplomové práce byl návrh otestován pomocí testovacího programu.

# 1 Akumulátorové baterie

Akumulátorové baterie jsou nedílnou součástí našich každodenních činností. Dnes už si život bez nich nedovedeme představit. Tato práce je zaměřena jen na určité typy, které jsou vhodné pro použití jako bateriové úložiště.

Bateriové články jsou zdrojem stejnosměrného proudu, který produkuje volné elektrony, které mají za následek elektrický potenciál. Skládají se ze záporné elektrody, kladné elektrody, separátoru a elektrolytu. Články se dělí na primární a sekundární. Primární články jsou jednorázové, takzvaně nelze je opětovně nabít. Proto se práce zabývá pouze sekundárními, které lze díky jejich konstrukci a chemickému složení opětovně nabíjet a vybíjet. [1]

- *Záporná elektroda* – je aktivní hmota, v průběhu redoxní reakce uvolňuje volné elektrony a dochází k oxidaci (nazýváme ji katoda).
- *Kladná elektroda* – dochází k redukci, z toho plyne, že volné elektrony jsou přijímané (nazýváme ji anoda).
- *Separátor* – je porézní membrána, která má za úkol oddělit elektrody různých potenciálů a zajišťuje propustnost iontů.
- *Elektrolyt* – je látka s vlastností iontové vodivosti.

## 1.1 Typy akumulátorů

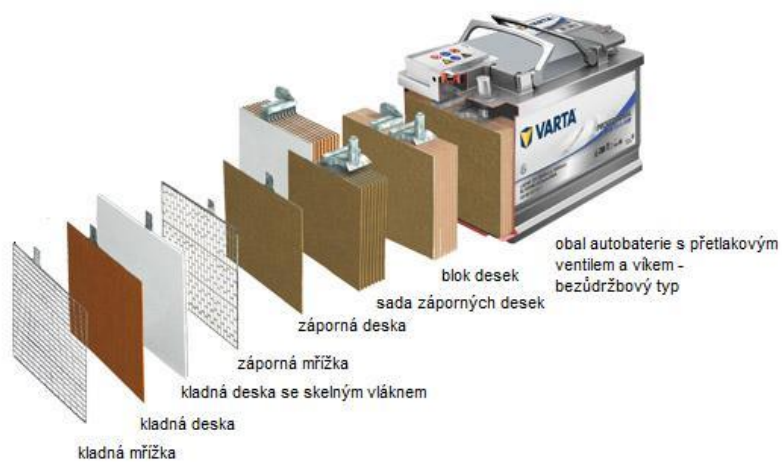
Akumulátorových baterií je velká řada, v práci jsou představeny jen ty, které se hodí pro aplikaci bateriového úložiště. Na akumulátory jsou kladeny vysoké nároky na životnost, nabíjecích a vybíjecích proudů, tak i jejich cenu. Nelze najít akumulátor, který bude mít všechny parametry výborné, s ohledem na konkrétní aplikaci. Proto je potřeba při volbě akumulátorů dělat kompromisy. Pro aplikaci bateriového úložiště je důležitá životnost, vybíjecí proudy a rozměry. S tím souvisí měrná energie. Na konci této kapitoly jsou srovnány vlastnosti jednotlivých akumulátorů a je vybrán nejvhodnější typ akumulátoru pro aplikaci bateriového úložiště.

### 1.1.1 Olověné akumulátory

Baterie se skládá ze dvou olověných destiček, které jsou ponořené do zředěné kyseliny sírové. Vnitřní uspořádání baterie je zobrazeno na Obr. 1.1. Při připojení baterie na zdroj, začne probíhat elektrolýza. Začnou se vytvářet další molekuly kyseliny a elektrolyt začne houstnout. Při odpojení od zdroje a připojení na zátěž nám vznikne opačný děj. Tento typ akumulátorů se používá převážně v automobilovém průmyslu. [1, 2]

Vlastnosti olověného akumulátoru:

- výhodou je jejich cena, dostupnost a robustnost
- nevýhodou je jejich hmotnost, rozměry a životnost



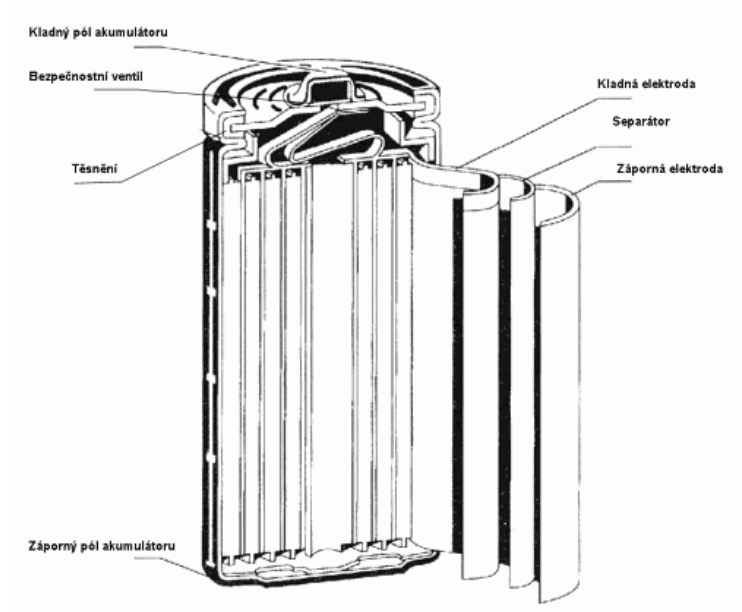
Obr. 1.1 Olověný akumulátor [převzato 3]

### 1.1.2 NiCd akumulátory

Nikl-Kadmiové akumulátory jsou v práci uvedeny pouze pro úplnost. Jinak tento typ baterií se kvůli kadmium, které je škodlivé pro životní prostředí, vyrábí už jen pro speciální účely. Na Obr. 1.2 je uvedeno rozložení akumulátoru. Aktivní složkou kladné elektrody je ve vybitém stavu hydroxid nikelnatý a záporné elektrody hydroxid kademnatý. [1,4]

Vlastnosti NiCd akumulátoru:

- výhodou jsou jejich velké odběrové proudy, životnost a odolnost proti přebití
- nevýhodou je jejich náročnost na životní prostředí (kadmium), paměťový efekt a malá hustota energie



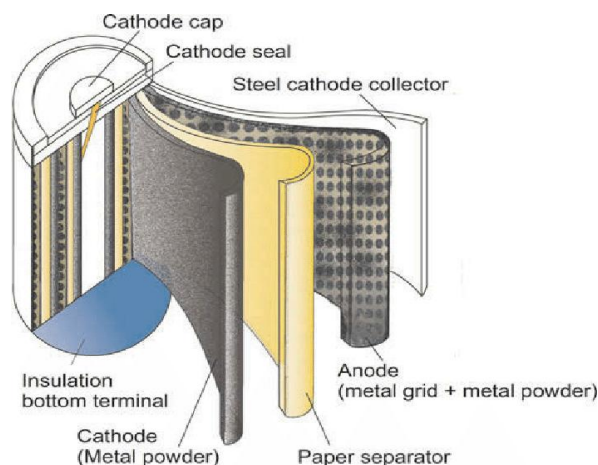
Obr. 1.2 NiCd akumulátor [převzato 4]

### 1.1.3 NiMH akumulátory

U Nikl-Metal-Hydridových akumulátorů se stále zlepšují jejich parametry. Je to z důvodu, že jsou relativně nové oproti například oloveným akumulátorům, které jsou zde okolo 150 let. Vnitřní uspořádání akumulátoru je zobrazeno na Obr. 1.3. Používají se převážně jako náhrada *NiCd* akumulátorů, kde je odstraněn problém se znečišťováním životního prostředí. [1, 4]

Vlastnosti NiMH akumulátoru:

- výhodou je jejich vyšší hustota energie, malý paměťový efekt a velký vybíjecí proud
- nevýhodou je jejich malá životnost, nižší mechanická pevnost a velké samovybití

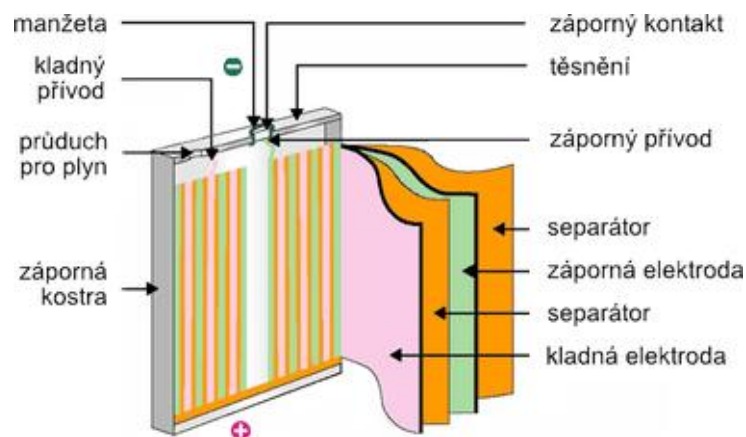


Obr. 1.3 NiMH akumulátor [převzato 5]



### 1.1.4 Lithiové akumulátory

Lithiové akumulátory jsou v dnešní době nejrozšířenější. Mají velice příznivou hustotu energie, vysokou účinnost a nemají skoro žádný paměťový efekt. Na Obr. 1.4 je zobrazena vnitřní struktura akumulátoru. Lithiových akumulátorů je celá řada. Lithium je prvek s velice vysokou hodnotou elektrochemického potenciálu. [4, 6, 7]



Obr. 1.4 Lithiový akumulátor [převzato 7]

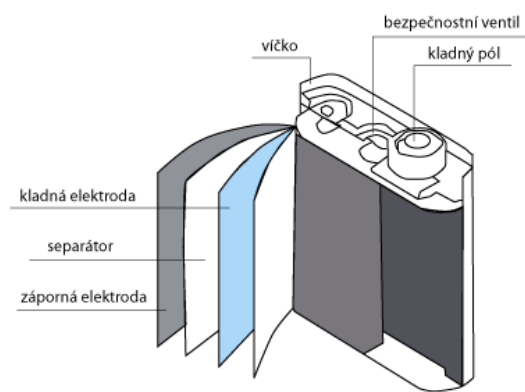
#### 1.1.4.1 Li-Ion

Akumulátory *Li-Ion* jsou v dnešní době velice rozšířené v přenosných počítačích, mobilních zařízeních, v ručním nářadí, ale i například v trakci. Je to díky jejich vysokému vybíjecímu proudu. Vnitřní uspořádání akumulátoru je zobrazeno na Obr. 1.5. Anoda *Li-Ion* akumulátoru je vyrobena z uhlíku, katoda je tvořena oxidem kovu a elektrolyt je vytvořen pomocí lithiové soli v organickém rozpouštědle. [4, 6, 7, 8]

Vlastnosti Li-Ion akumulátoru:

- výhodou je jejich vysoká měrná energie, účinnost, vybíjecí proud, životnost a takřka nulové samovybití
- nevýhodou je jejich citlivost na vysoké teploty a přebíjení, postupem času ztrácejí kapacitu, při úplném vybití dojde ke zničení akumulátorů

Průřez prizmatickým Li-Ionovým akumulátorem SAFT



xintb  
extra  
notebook

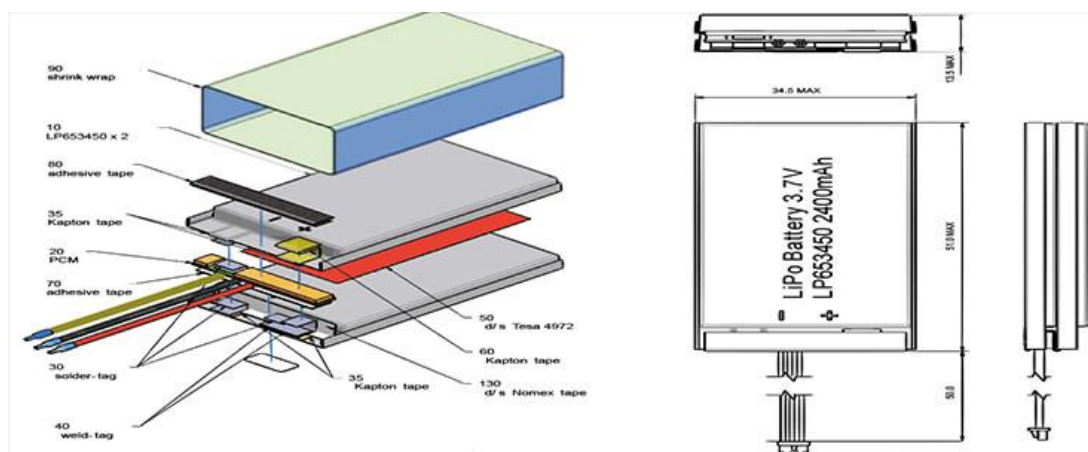
Obr. 1.5 Li-Ion akumulátor [převzato 8]

### 1.1.4.2 Li-Pol

Lithium polymerové akumulátory jsou další fází vývoje lithiových baterií. Li-Pol akumulátor je zobrazen na Obr. 1.6. Skládají se z anody, která je tvořena oxidem dimanganatolihným, katody, která je tvořena lithiem a elektrolytem tvořeným pevným polymerem, namísto tekutého. Akumulátory se opět uplatnily v ručním nářadí, v mobilních zařízeních a podobně. [4, 6, 7, 9]

Vlastnosti Li-Pol akumulátoru:

- výhodou je jejich nízká hmotnost při vysoké hustotě energie, jejich účinnost, malý paměťový efekt a lépe se hodí do aplikací, které se používají v nízkých teplotách (pevný elektrolyt)
- nevýhodou je jejich vyšší cena oproti Li-ion, stárnutí článku při dobíjecích cyklech a při přetížení může dojít k mechanickému poškození článku



Obr. 1.6 Li-Pol akumulátor [převzato 9]

### 1.1.4.3 LiFePO<sub>4</sub>

Lithium-Železo-Fosfátové akumulátory jsou jedny z nejpoužívanějších. Častý výskyt *LiFePO<sub>4</sub>* akumulátorů je v solárních elektrárnách a v trakci. Akumulátor je zobrazen na Obr. 1.7. Označení *LiFePO<sub>4</sub>* vzniklo díky katodě, která je z tohoto materiálu vyrobena. Nové články jsou z výroby částečně nabity, avšak před prvním použitím je bezpodmínečně nutné nabít akumulátor na plnou kapacitu. Toto prvotní nabití by mělo být provedeno proudem maximálně půl násobku kapacity akumulátoru na napětí  $U = 3,8 \div 4 V$ . Jak správně prvotně nabít akumulátor, udává výrobce v katalogovém listu. [4, 6, 7, 10]

Vlastnosti LiFePO<sub>4</sub> akumulátoru:

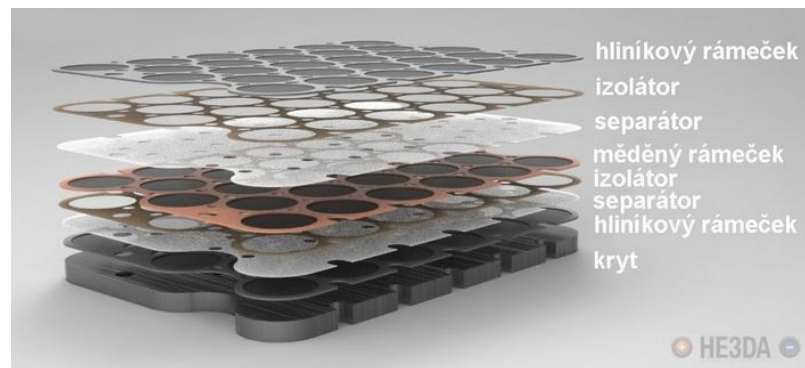
- výhodou je jejich malý vnitřní odpor, velká účinnost a jejich bezpečnost a to i v extrémních podmínkách. Jsou schopny dodávat vysoké proudy a pokrýt tak špičkový odběr
- nevýhodou je jejich vyšší cena a nižší hustota energie



Obr. 1.7 LiFePO<sub>4</sub> akumulátory [převzato 10]

### 1.1.4.4 HE3DA

Akumulátory *HE3DA* jsou vyrobeny panem Ing. Janem Procházkou, který si technologii nechal patentovat. Vnitřní uspořádání akumulátoru je zobrazeno na Obr. 1.8 a na Obr. 1.9 je jeho podoba. Akumulátor by měl být nejbezpečnější na trhu. Dokonce mu nevádí ani přebíjení nebo pod-vybíjení. Proto by nepotřebovaly akumulátory *BMS*. Výhoda akumulátoru je v jeho separátoru, který je mnohonásobně odolnější než doteď používaný. Složení separátoru není známo, autor pan Procházka si ho velice střeží. V době, kdy byla psaná tato diplomová práce, akumulátor nebyl ještě k dispozici. Proto vlastnosti akumulátoru nejsou známé. [11, 12]



Obr. 1.8 HE3DA složení [převzato 11]



Obr. 1.9 HE3DA akumulátor [převzato 12]

## 1.2 Veličiny a vlastnosti akumulátorových článků

V této kapitole jsou stručně popsány vlastnosti a veličiny, které se nejvíce používají pro popis akumulátorů. Klíčové vlastnosti a veličiny jsou zaneseny do Tabulka 1. [1, 4]

- *Jmenovité napětí článku* – udává napětí článku označené  $U_N$  [V]. Hladiny napětí udává norma.
- *Jmenovitá kapacita* – označovaná jako  $C_N$  [Ah]. Výrobci deklarují hodnotu kapacity uvedenou na štítku akumulátoru. Je to tedy součinitel vybíjecího proudu a doby vybíjení (popřípadě nabíjecího proudu a doby nabíjení). Kapacita je tedy celkový elektrický náboj, který je článek schopný dodat (popřípadě pojmout). Jmenovitá kapacita není uvedena v tabulce.
- *Energetická účinnost* – účinnost je definovaná jako poměr nabíjecího cyklu, ku vybíjecímu cyklu.
- *Hustota energie a měrná energie* – udávají elektrické parametry na jednotku mechanických parametrů.
  - *Objemová energie* [ $Wh * dm^{-3}$ ] je dána maximální elektrickou energií, kterou může odebrat z 1  $dm^3$  objemu akumulátoru.
  - *Měrná energie* [ $Wh * kg^{-1}$ ] je to maximální množství, které akumulátor je schopný odebrat.

- *Samovybíjení* – je to nežádoucí proces, který způsobuje ztrátu energie.
- *Životnost* – je definovaná jako doba, po kterou kapacita akumulátoru klesne pod 80 %. Uvádí se většinou v čase, ale může být určena i počtem cyklů.
- *Teplotní rozsah* – tím se rozumí rozsah teplot, v kterých lze akumulátor bezpečně provozovat, aniž by se degradovali jeho vlastnosti.
- *Počet cyklů* – je určen dobou, po kterou kapacita akumulátoru klesne na 80 % její výchozí kapacity.
- *Nabíjecí a vybíjecí proudy* – jsou to proudy, které lze z akumulátoru odebírat nebo do akumulátoru dodávat.

Tabulka 1: Srovnání akumulátorů

Akumulátory	Olověný	NiCd	NiMH	Li-Ion	Li-Pol	LiFePo4
Jmenovité napětí článku [V]	2	1,2	1,2	3,7	3,6	3,2
Objemová energie [Wh/l]	60-70	60	170	200	300	90-110
Měrná energie [Wh/kg]	30-50	50-80	60-110	200	100-200	180-220
Samovybíjení (za měsíc) [%]	3-20	20	30	5	3	2
Životnost	<3 roky	>5 let	>4 roky	>5 let	>4 roky	>5 let
Teplotní rozsah [°C]	-30 až +50	-40 až +70	-30 až +50	-20 až +40	-20 až +60	-20 až +55
Počet cyklů	500-800	1500	300-500	2000	800	2000
Nabíjecí proud	0,5 C	0,5 C	0,5 C	0,5 C	1 C	0,5 C
Vybíjecí proud	0,5 C	0,3 C	0,5 C	1 C	0,5 C	0,5 C
Paměťový efekt	ANO	ANO	NE	NE	NE	NE
Účinnost [%]	60-90	65-85	65-85	80-90	80-90	85-95

### 1.3 Výběr akumulátorových článků

Výběr akumulátoru pro aplikaci bateriového úložiště, byl na základě klíčových vlastností a veličin. Po prozkoumání výše sestavené tabulky a dalších podkladů byl zvolen akumulátor na bázi Lithia typu  $LiFePO_4$ . Hlavní předností  $LiFePO_4$  je jeho životnost, bezpečnost, účinnost a rozšíření v aplikacích pro elektrárny a trakci.

Návrh BMS by se neměl zaměřovat na konkrétní typ akumulátorů, měl by být co nejuniverzálnější, nebo se zaměřit na typ chemie. Proto níže postavený návrh je zaměřen na většinu Lithiových akumulátorů. Lze tedy použít například typy  $Li-Ion$ ,  $Li-Pol$  a  $LiFePO_4$ .

## 2 Bateriový management

Pro většinu aplikací je nemožné využít jediného akumulátorového článku. Proto je zapotřebí využít většího počtu článků. Ty se proto musí spojovat, a to sériově (dosažení vyššího jmenovitého napětí) nebo paralelně (dosažení vyššího jmenovitého proudu a kapacity). Problém, který nastane spojováním článků, ať už sériově nebo paralelně, je nerovnoměrné napětí článků. To způsobí nerovnoměrné vybíjení a nabíjení akumulátorových baterií. Je to dané technologií výroby a stářím jednotlivých akumulátorů. Nejslabší akumulátor, určuje vlastnosti celého systému. Proto je nutné články vyrovnávat na stejnou napěťovou hladinu, to má za úkol bateriový management. [13]

Hlavní úkoly BMS:

- Hlídat stav nabití a vybití článků (*BMS* se stará o to aby akumulátorové baterie měly co největší životnost).
- Hlídat teplotu (teplota se hlídá mezi články nejčastěji pomocí *NTC* termistorů).
- Dlouhodobě monitorovat akumulátory.
- Informovat o stavu akumulátorů nadřazený systém.

### 2.1 Rozdělení BMS

Bateriový management lze udělat dvěma způsoby. Prvním typem je analogové *BMS*, kde pomocí operačních zesilovačů a komparátorů se řídí balancování systému. Systém je ale velice složitý, kde na jeden akumulátor musí být minimálně dva komparátory. Jeden komparátor vyhodnocuje přepětí článků a druhý jeho podpětí. V dnešní době integrovaných obvodů se tento systém takřka nepoužívá. Druhým typem je digitální *BMS*, které se používá mnohem častěji, díky jeho integritě. Pomocí integrovaných obvodů lze účinně řídit vyvažování akumulátorů. Proto návrh v této diplomové práci je zaměřený na digitální *BMS*.

### 2.2 Klíčové požadavky na BMS

Proto, aby akumulátorové baterie měly co největší možnou životnost, je nutné dodržet několik klíčových parametrů, které udává výrobce.

### 2.2.1 Stav nabití (SoC)

Stav nabití (State Of Charge) dává informaci o aktuálním stavu akumulátoru, tedy poměru aktuálně zbývající energie a využitelné energie. Udává se v procentech jmenovité kapacity (0 % - plně vybitá, 100 % plně nabitá) nebo v ampér-hodinách. BMS na základě SoC vyhodnocuje provozní i kritické stavy akumulátorů. Udává stav akumulátoru v jednom cyklu nabití a vybití. Stav nabití lze vypočítat podle níže uvedených rovnic 2.1, 2.2, 2.3 a 2.4 [14 a 15].

$$SOC = \frac{Q}{Q_c} * 100 = 100 - DOD [\%] \quad (2.1)$$

$$SOC = SOC_0 - \frac{t_0}{t} \int \eta * i(t) dt [Ah] \quad (2.2)$$

$$SOC = 1 - \frac{\int i(t) dt}{C_n} [Ah] \quad (2.3)$$

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C_n} \int (I_{batt} - I_{loss}) dt [Ah] \quad (2.4)$$

### 2.2.2 Hloubka vybití (DoD)

Hloubka vybití (Depth Of Discharge) je alternativou stavu nabití. Udává poměr energie využitelné k energii instalované. Jednotkou DoD jsou opět procenta. U hloubky vybití je tomu naopak oproti stavu nabití (0 % - plně nabitá, 100 % - plně vybitá). Hloubka vybité lze vypočítat podle rovnice 2.5 [14 a 15].

$$DOD = 100 - SOC [\%] \quad (2.5)$$

### 2.2.3 Zdravotní stav akumulátoru (SoH)

Zdravotní stav akumulátoru (State Of Health) představuje schopnost splňovat svůj definovaný výkon. Jinak řečeno je to aktuální kondice akumulátoru oproti novému akumulátoru. Opět se uvádí v procentech (100 % - stav nového akumulátoru). Ze zdravotního stavu akumulátoru lze určit jeho životnost. Je tedy založen na historii akumulátoru. [14, 15]

## 2.2.4 Nabíjecí a vybíjecí proudy

Při nabíjení se do akumulátoru ukládá náboj, který definuje výrobce akumulátorů. Výrobce stanoví maximální nabíjecí napětí a proud. Velikost nabíjecího proudu je udávána pomocí absolutní hodnoty [A], nebo jako vyjádření násobku jmenovité kapacity akumulátoru (1C, 3C...).

Vybíjecí proudy jsou analogickým procesem nabíjecích proudů. Dovolené vybíjecí proudy opět určuje výrobce. Bateriový management ve spolupráci s nadřazením řízením (například nabíječka) hlídat, aby se povolené meze stanovené výrobcem nepřekročily. To by způsobilo poškození akumulátoru nebo zkrácení doby jeho životnosti. Výrobce dále udává špičkový vybíjecí proud, který je podmíněn krátké době (řadově v jednotkách sekund). [14, 15]

## 2.2.5 Provozní teploty

Provozní teploty definují rozsah teplot, ve kterých může být akumulátor provozován. Rozsah udává výrobce akumulátorů. Vysoká teplota působí nepříznivě na článek a tím výrazně zkracuje její životnost. Teplota roste s nabíjecími a vybíjecími cykly. Naopak u nízkých teplot se životnost prodlužuje, ale jeho vybíjecí proud je omezen vlivem zvyšování vnitřního odporu. [14, 15]

## 2.3 Bateriový management

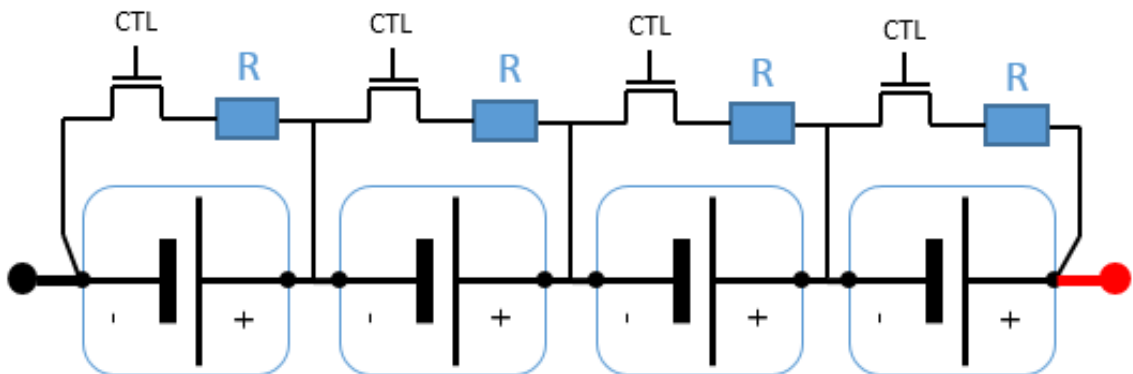
Balancování akumulátorů se provádí z důvodu vyrovnání napěťových hladin na jednotlivých článcích v *aku-packu*. Nevyrovnané napěťové hladiny jsou způsobené rozdílností článků. To znamená například, že každý článek je jinak starý (rozdíly mohou být dny, týdny i měsíce), ale hlavní nevyrovnanost hladin vzniká díky výrobě článků (tolerance). Následek nevyrovnanosti parametrů je zkracování životnosti celého *aku-packu*. Bateriový management se nastaví na maximální a minimální dovolené napětí. Systém se pak snaží držet se v uvedených hodnotách. Balancování nastane při navyšování rozdílu napětí na jednotlivých akumulátorech. Hodnota rozdílu je nastavitelná v *BMS*. Balancování se rozděluje na aktivní a pasivní. Balancovací proud se nejčastěji dimenzuje na 5 až 10 % z jmenovitého proudu akumulátoru (100 Ah baterie by se měla balancovat 5 až 10 A). Při velkém balancovacím proudu by docházelo k velkému kolísání napětí. Daný akumulátor by měl pilový průběh napětí při balancování. Na druhou stranu příliš malý proud by způsobil malé balancovací proudy a článek by musel ba-



lancovat takřka po celou dobu nabíjení. Oba extrémny, jak velký, tak i malý balancovací proud se používá, jen je potřeba upravit algoritmus vyvažování. [14, 15]

### 2.3.1 Pasivní BMS

Nejrozšířenější koncepcí jsou takzvané ztrátové, ale spíše se jim říká pasivní *BMS*. Jejich princip je založen na přeměně energie nejvíce nabitého článku do podoby tepla. Tato energie se „pálí“ na výkonových rezistorech. Ty jsou v sérii s výkonovými *MOSFET* tranzistory jak je ukázáno na Obr. 2.1. Proces pasivního balancování funguje tak, že se část nabíjecího proudu přemostí díky sepnutí výkonového tranzistoru. Proud, který teče přes tranzistor je omezen výkonovým rezistorem. Většinou se dimenzuje na 5 až 10 % z kapacity akumulátoru. Článek se nabíjí menším proudem oproti ostatním a akumulátory v sestavě se začnou vyrovnávat. Spínání tranzistorů zajistí řídicí systém. Pasivní balancování má tu výhodu, že oproti aktivnímu balancování je jednodušší. Další nespornou výhodou je jeho cena, která je mnohonásobně nižší než u aktivního balancování. [14, 15]



Obr. 2.1 Pasivní vyvažování [převzato 16]

### 2.3.2 Aktivní BMS

Princip aktivního balancování spočívá v „přelévání“ energie od nejvíce nabitého článku k nejméně nabitému článku. Ztráty aktivního balancování jsou minimální, takřka zanedbatelné oproti pasivnímu balancování. To je jejich velká výhoda. Naproti tomu má aktivní *BMS* značně nevýhod. Největší nevýhodou je jeho cena, která je spojená s větším počtem součástek. To je způsobené tím, že u aktivního *BMS* je velký počet výkonových prvků a značná složitost řídicího systému. Velký počet součástek způsobuje větší poruchovost, která může způsobit zničení celého bateriového packu. Zdánlivou nevýhodou u aktivního balancování jsou

malé vyrovnávací proudy, to je ale špatně pochopeno. Aktivně balancovat lze po celou dobu nabíjení popřípadě vybíjení, protože ztráty jsou minimální a energie se pouze přelévá. Proto není potřeba velkých vyrovnávacích proudů jako je tomu u pasivního balancéru. Výrobci často udávají *BMS* systémy jako aktivní, ale většinou je to ve smyslu možnosti změn parametrů. Z důvodu výše uvedených nevýhod se aktivní *BMS* v dnešní době v průmyslu moc nepoužívá.

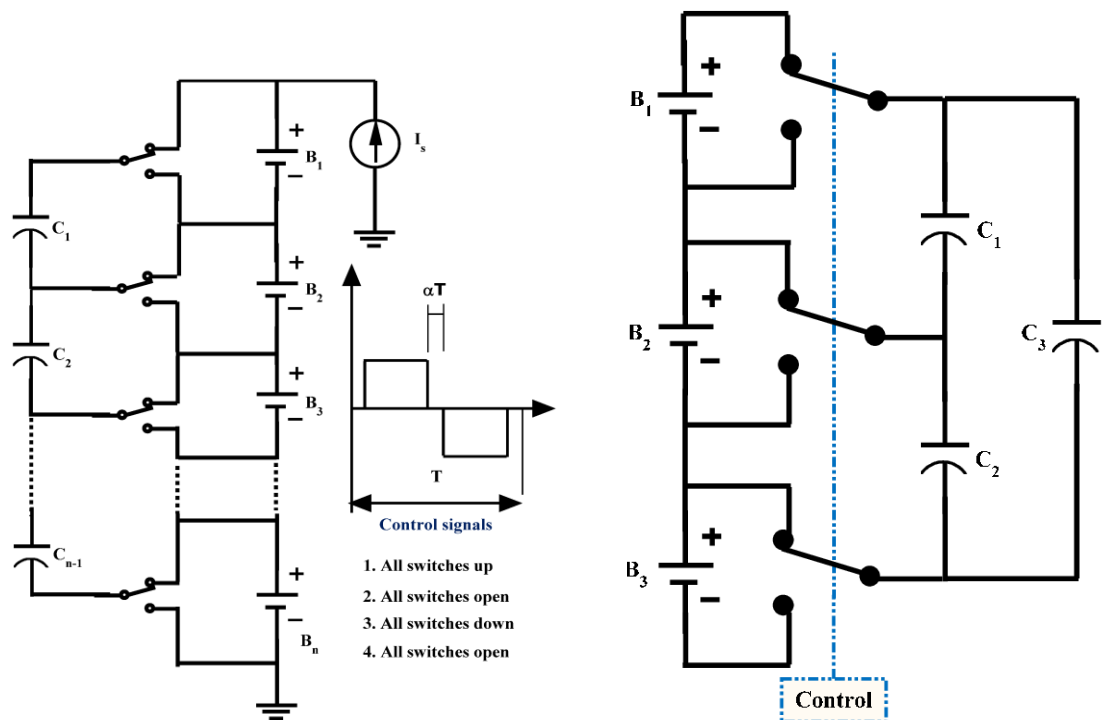
Aktivní balancéry se rozdělují do tří kategorií. Podle toho, jestli se energie bere z akumulátoru a dodává se do celého *aku-packu*, nebo se energie bere z celého *aku-packu* a dodává se do jednoho akumulátoru. Těmto balancérům se říká jednosměrný. Poslední typ je balancér, který umí oba směry toku energie. To znamená, že se jeden článek dokáže vybit a zároveň jiný nabít. Těmto balancérům se říká obousměrné. [17, 19]

Dále se aktivní balancéry rozdělují podle způsobu přeměny energie na:

- *Kapacitní balancéry*
- *Induktivní balancéry*

### 2.3.2.1 Kapacitní balancéry

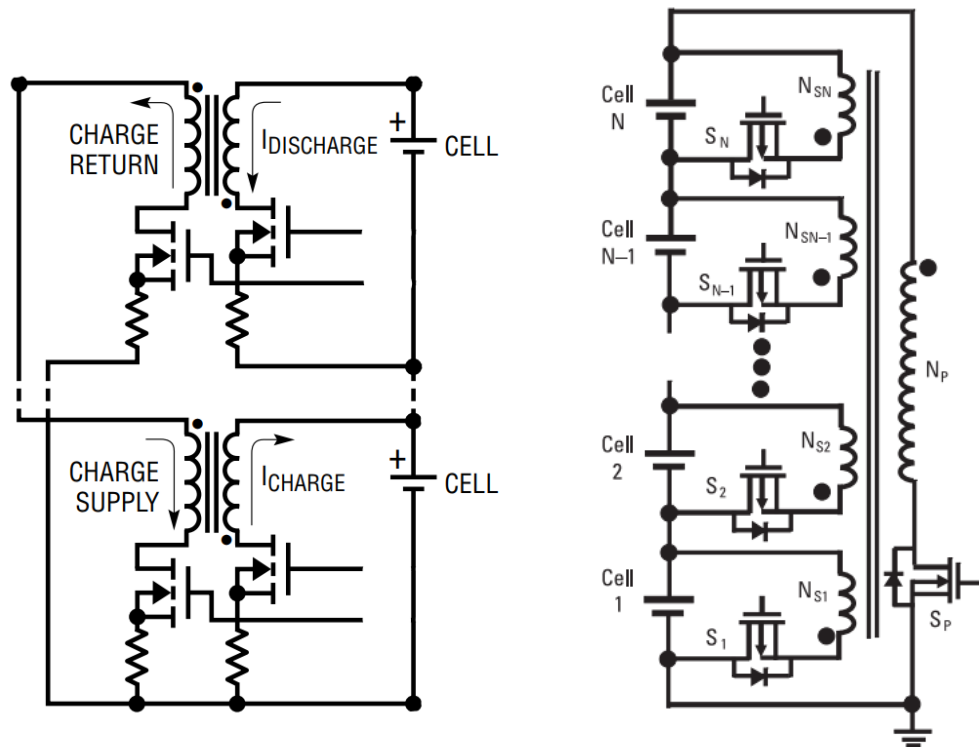
Kapacitní vyvažování jak je ukázáno na Obr. 2.2, je založené na principu nábojových pump. Kondenzátor je akumulační prvek, který dodává nebo odebírá energii a vyvažuje tak napěťovou hladinu. Kapacitní balancéry se dělí podle počtu použitých kondenzátorů. Prvním typem je takzvaný globální kondenzátor. Pomocí několika spínačů se připojuje kondenzátor k akumulátorům. Druhým typem je použití více kondenzátorů. Počet kondenzátorů je závislý na počtu akumulátorů. Tedy počet kondenzátorů bude o  $N-1$  menší než počet akumulátorů (kde  $N$  je počet akumulátorů). Poslední varianta je kombinace obou předchozích. Velkou nevýhodou kapacitních balancérů je nízká účinnost, která většinou nepřesahuje 50 %. [17]



Obr. 2.2 Aktivní vyvažování pomocí kondenzátorů [převzato 18]

### 2.3.2.2 Induktivní balancéry

Vyvažování vyplývá z potřeby mít v obvodu nějakou akumulaci součástku. Induktivní vyvažování využívají transformátory nebo tlumivky. Induktivních balancérů je celá řada. Jedná se převážně o měniče *Buck-Boost* a *Flayback*. Oba zmíněné typy umožňují obousměrný přenos nebo jednosměrný. Záleží na typu použitých součástek (transformátor nebo tlumivka). Měníče s transformátorem jsou výhodnější z důvodu jednoduché změny napětí pomocí počtu závitů na transformátoru. Další výhodou je galvanické oddělení. Jsou ale o něco dražší než je tomu u tlumivek. Induktivní balancéry mohou dosahovat až 90 % účinnosti přeměny energie. Aktivní vyvažování pomocí transformátoru je uveden na Obr. 2.3. [19]



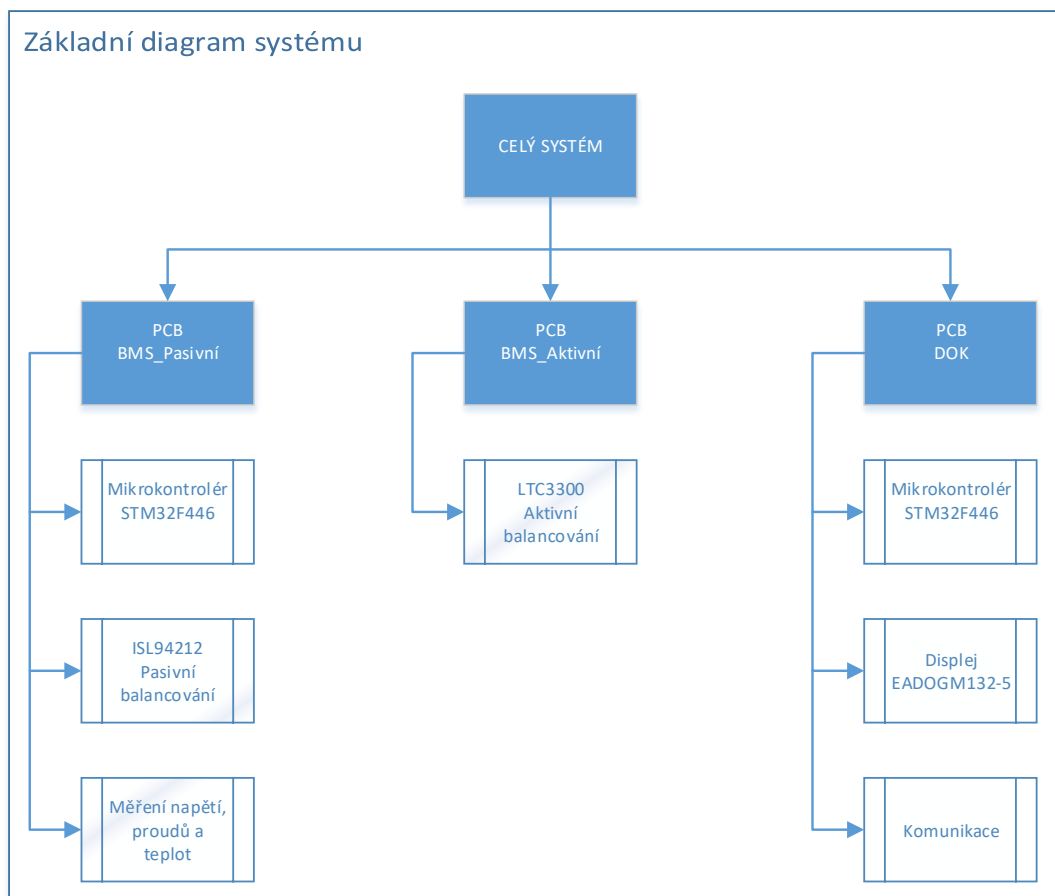
Obr. 2.3 Aktivní vyvažování pomocí transformátoru [převzato 19, 31]

## 2.4 Výběr typu balancéru

Návrh BMS je zaměřen na kapacity akumulátorů od několika jednotek až po stovky ampér-hodin. Proto bude návrh kombinací aktivního i pasivního balancování, jak bude ukázáno dále. Výběr obou typů balancérů byl také z důvodu testování jejich výhod a nevýhod. Aktivní balancér byl, kvůli lepší účinnosti, vybrán induktivní. Využití obou balancérů dává velké možnosti, jak účinně řídit životnost akumulátorů.

### 3 Návrh systému pro řízení vyvažování akumulátorů

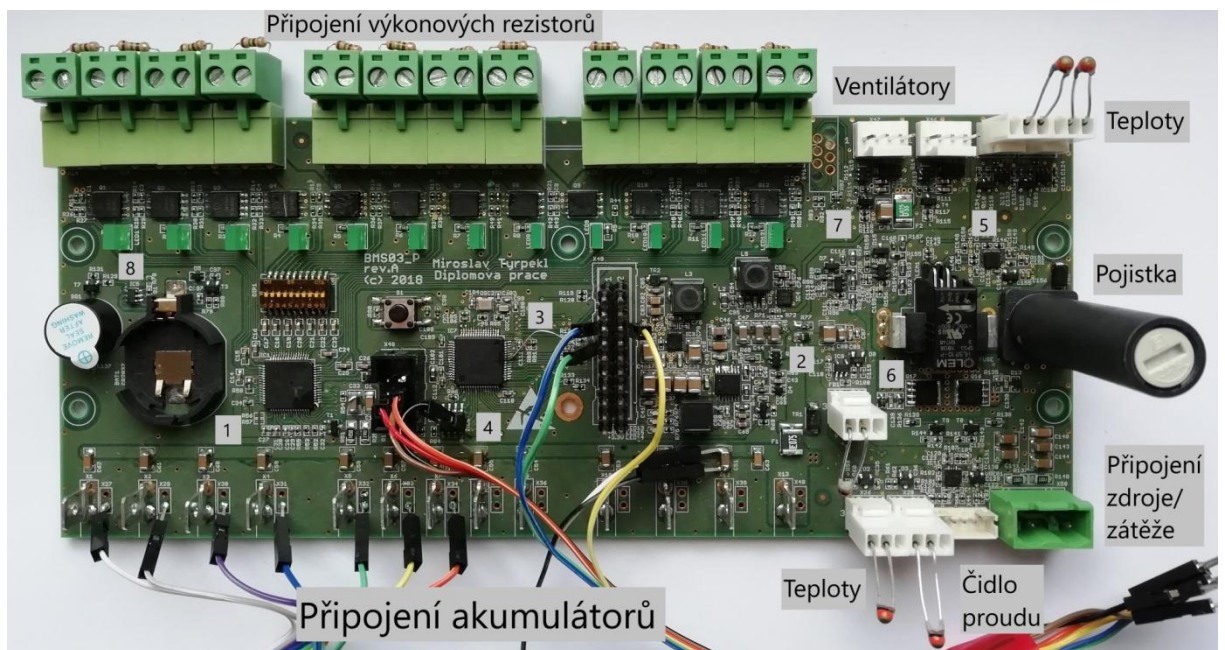
Návrh je konstruován pro řízení od 6 do 12 článků. Počet článků se volí pomocí drátových propojek. Návrh je rozdělen na tři desky plošných spojů zkráceně *DPS*, jak je uvedeno na Obr. 3.1. První *DPS* s názvem *BMS\_P* je tvořena mikrokontrolérem, který se stará o celý systém a integrovaný obvod *ISL94212*, který má za úkol měření článků a pasivní balancování jednotlivých akumulátorů. Druhá *DPS* je označena jako *BMS\_A* a je tvořena pomocí dvou integrovaných obvodů typu *LTC3300*. Kde každý z *LTC3300* má na starosti 6 článků. Poslední *DPS* je pojmenovaná *DOK* a je určena pro komunikaci s nadřazeným systémem a zobrazení veličin na displeji. Celý systém *BMS* je koncipovaný do rozměru boxu  $210 \times 90 \times 58 \text{ mm}$ , který lze nasadit na *DIN* lištu, například do rozvaděče. Typ box je *B6707102* od společnosti *OKW*.



Obr. 3.1 Rozdělení systému na jednotlivé DPS

### 3.1 Deska plošného spoje BMS\_P

Deska plošného spoje *BMS\_P* je uvedena na Obr. 3.2. Je určena pro řízení a měření celého systému. Bez této desky je systém zcela nefunkční a nedá se bez ní obejít. U zbylých dvou desek to neplatí. Měření, vyhodnocení a balancování (pouze pasivní) je součástí této DPS. Proto je nezbytnou součástí systému. Dále se na desku připojují jednotlivé články. Celý systém je řízený pomocí mikrokontroléru *STM32F446* od společnosti STMicroelectronics.



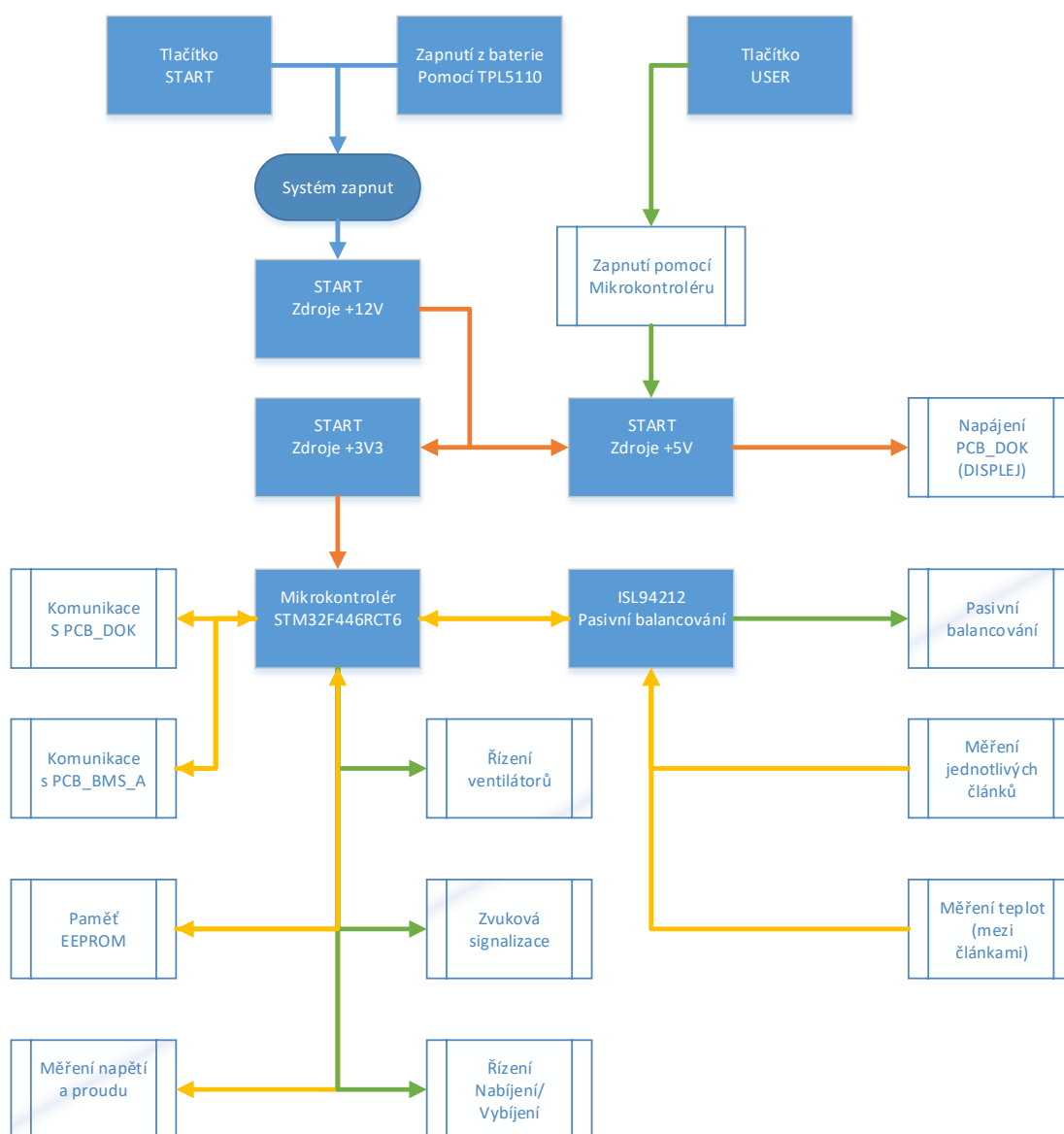
Obr. 3.2 Jednotka BMS\_P

Deska plošného spoje *BMS\_P* se skládá z osmi hlavních částí, které jsou označeny čísly na Obr. 3.2:

- 1) *Integrovaný obvod ISL94212*
- 2) *Napájení systému*
- 3) *Mikrokontrolér*
- 4) *Paměť EEPROM*
- 5) *Měření napětí, proudu a teplot*
- 6) *Nabíjení a vybíjení*
- 7) *Ovládání ventilátorů*
- 8) *Obvod TPL5110*

### 3.1.1 Blokový diagram BMS\_P

Jednotka *BMS\_P* obsahuje mikrokontrolér řady *STM32F4*, integrovaný obvod *ISL94212*, paměť *EEPROM*, měření teplot, *DC/DC* měniče, atd... Nejdůležitější obvody budou podrobněji popsány v následujících kapitolách. Na Obr. 3.3 je znázorněn blokový diagram jednotky *BMS\_P*.



Obr. 3.3 Blokový diagram BMS\_P

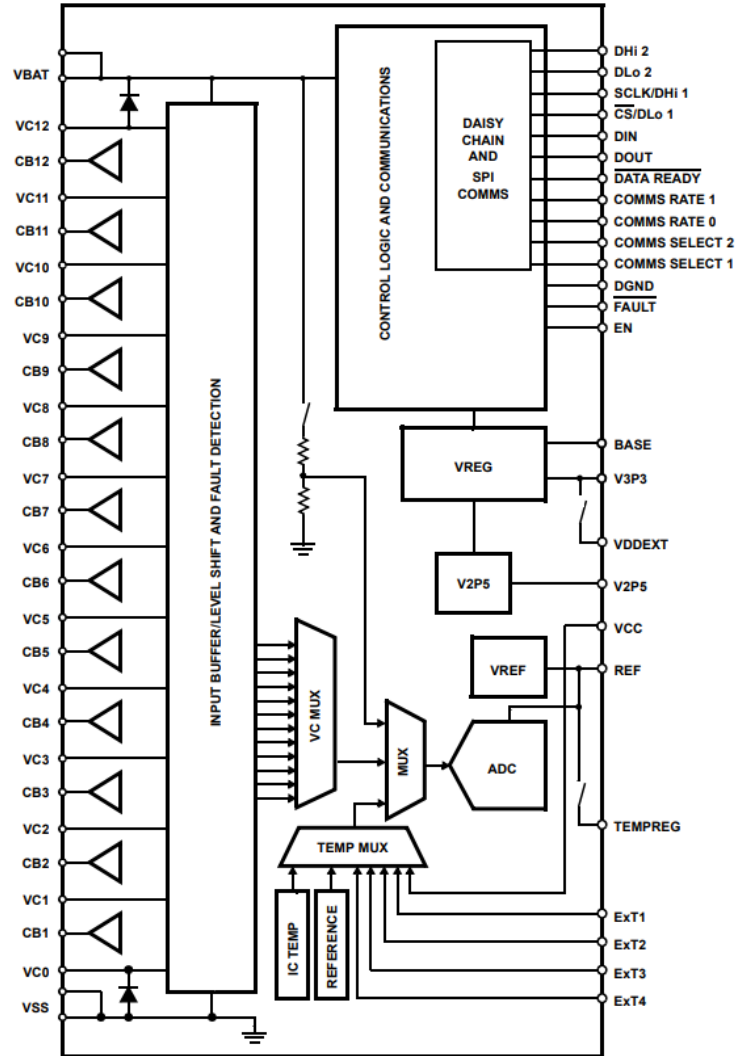
### 3.1.2 Integrovaný obvod ISL94212

Integrovaný obvod *ISL94212* může ovládat 6 až 12 článků. Je spojený pomocí *SPI* komunikace s nadřazeným systémem. V tomto případě je nadřazený systém mikrokontrolér *STM32*. Obvody *ISL94212* jdou řadit do takzvaného “*Daisy Chain*”. Je to komunikace mezi jednotlivými *ISL* obvody. Integrovaných obvodů *ISL* lze dohromady spojit až 32. K integrovanému obvodu je zapotřebí externí součástky pro vyvažování akumulátorů. Obvod má čtyři *ADC* vstupy, které jsou převážně využívány jako měření teploty mezi jednotlivými akumulátory. Dále obsahuje vnitřní hlídání komunikace. Při ztrátě komunikace se vypne regulační obvod. Rychlost *SPI* komunikace je až 2 *Mbps*. Pouzdro je 64 pinové typu *TQFP64*. Obvod nefunguje, pokud je jedna baterie v *aku-packu* vybitá na minimální napětí a zbytek akumulátorů je nabit na maximální napětí. Pro méně než 12 akumulátorů se sníží počet připojených baterií od středu. To znamená, že pro 6 akumulátorů se zapojí tři na piny *VC12* až *VC9* a další tři akumulátory na piny *VC3* až *VC0*. Na zbylých pinů se udělají nulové propojky. Obvod *ISL* nadřazenému systému poskytuje několik chybových zpráv, jako jsou přepětí, podpětí, rozpojené dráty a vysoká teplota. [20]



### 3.1.2.1 Vnitřní struktura obvodu ISL94212

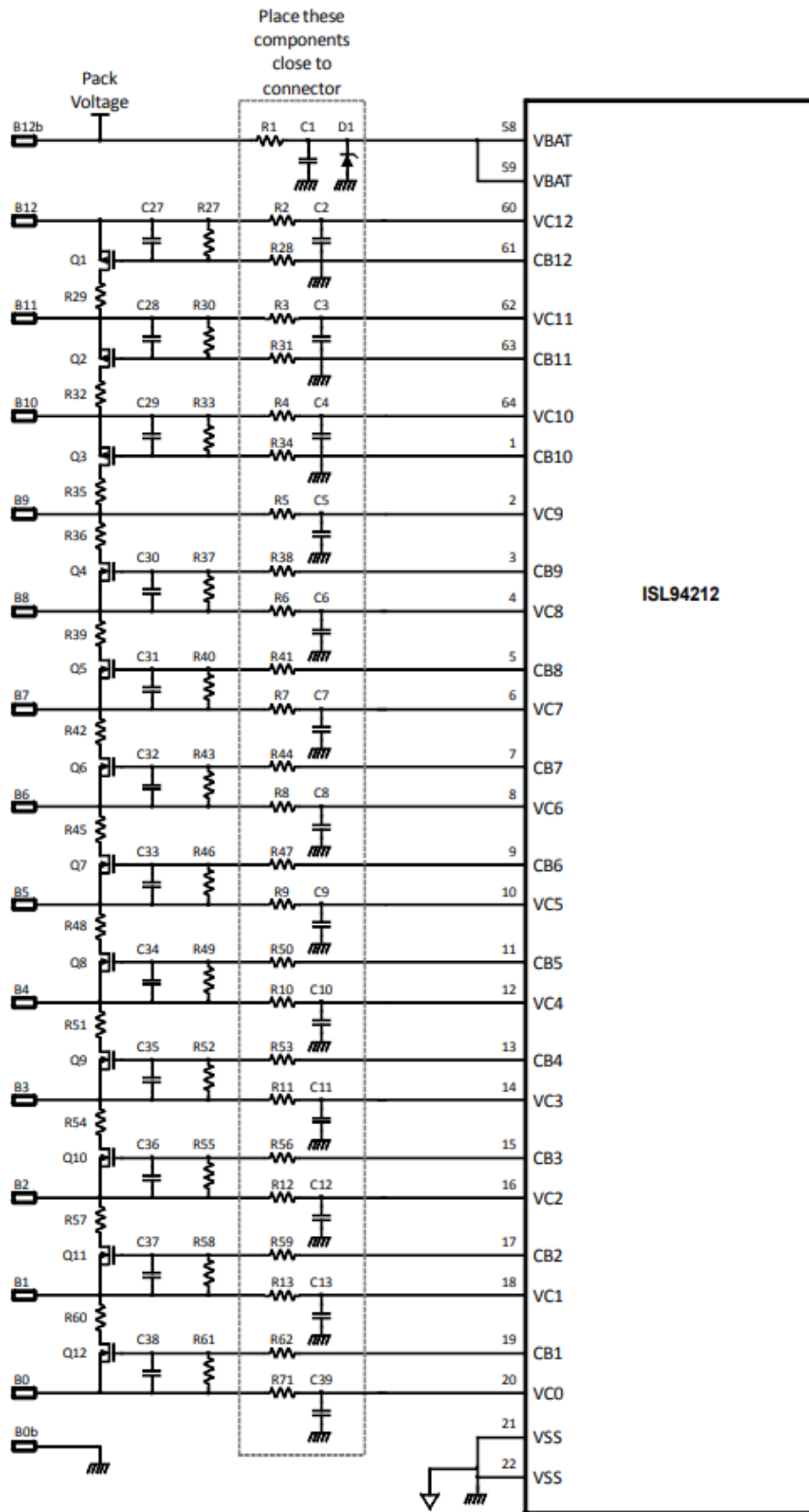
Na Obr. 3.4 je vnitřní struktura obvodu *ISL94212* a označení všech pinů.



Obr. 3.4 Vnitřní struktura obvodu ISL94212 [převzato 20]

### 3.1.2.2 Typické zapojení obvodu ISL

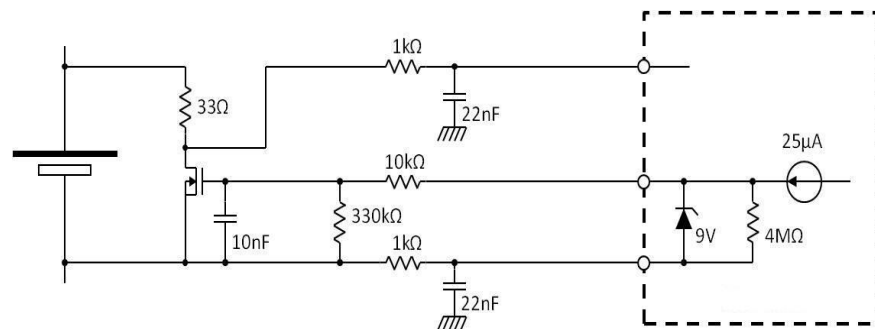
Všechny externí vstupy označené jako (*VC0-VC12*) na Obr. 3.5 do *ISL94212* jsou chráněny proti přechodovému napětí a mají omezený proud pomocí *RC* filtru. Navržen, tak aby maximálně potlačil elektromagnetické rušení. Komponenty vyznačené na obrázku níže by měly být co nejbližše konektoru s dobře rozlitou zemí, aby se minimalizoval šum pro měření vstupů. Komponenty na levé straně od vyznačené čáry by měly být co nejbližše u sebe a akumulátorů.



Obr. 3.5 Doporučené zapojení obvodu ISL pro 12 akumulátorů [převzato 20]

### 3.1.2.3 Výkonové tranzistory

Výkonové tranzistory pro balancování jsou řízené pomocí *CB* pinů, které jsou označeny na Obr. 3.5. Na Obr. 3.6 je typické zapojení pro pasivní balancování. Napětí na *GATU* (u *MOSFET* tranzistorů) je řízeno lokálně umístěným odporem mezi *GATEM* a *SOURCEM*. Rezistor v sérii s *GATEM* tranzistoru, je k ochranně vnějších i vnitřních *FET* tranzistorů (přechodové jevy). Mix tranzistorů *N-MOSFET* a *P-MOSFET* je z důvodu odstranění potřeby nábojové pumpy.



Obr. 3.6 Typické zapojení externích součástek [převzato 20]

### 3.1.2.4 Diagnostika rozpojených cest

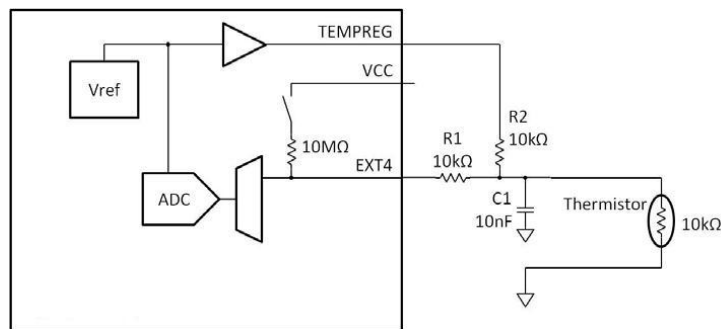
Test se provede na začátku měření. Načte se každý pin (*VC0-12*), hodnoty proudu jsou  $I = 150 \mu A$  nebo  $I = 1 mA$  přes rezistor o hodnotě  $R = 1 k\Omega$ , který sníží napětí na  $U = 1 V$ . Čas potřebný k přenosu se změří a vyhodnotí. Test je závislý na časové konstantě *RC* filtru.

### 3.1.2.5 Měření napětí během balancování

Měření se provádí na *MOSFET* tranzistoru, mezi *DRAINEM* a *SOURCEM* ( $U_{DS}$ ), které je vidět na obrázku číslo 17 na pinech označených jako *VC*.... Měření napětí na jednotlivých akumulátorech se provádí, když je balancování vypnuto. Z důvodu minimalizace chyby při měření. Vlivem balancovacího obvodu napětí na článku klesne, kdyby se v tuto chvíli změřil daný článek, měřené napětí by bylo o to menší. Pokles napětí je závislý na hodnotách výkonových rezistorů. Obvod *ISL* umožňuje nastavit časy pro měření a balancování. Rozsah měřícího napětí obvodu *ISL* je  $U = 4.9994 V$ . Toto napětí nastane v případě, že sousední článek bude odpojen. Pak obvod *ISL* změří napětí jednoho článku  $U = 5 V$  a druhého  $U = 0 V$ .

### 3.1.2.6 Externí vstupy

Obvod *ISL94212* obsahuje 4 externí vstupy pro použití buď jako obecné analogové vstupy nebo pro *NTC* termistory na měření teploty, jak je vidět na Obr. 3.7. Každý vstup má pull-up rezistor, který je připojen pomocí přepínače na *VCC* pin. Vstupy nad 15/16 z plného měřicího rozsahu jsou brány jako otevřené vstupy a způsobí (vyhodnotí) poruchu přehřátí. Pak uživatel musí rozpoznat, zda se jedná o chybu spojenou nepřipojeným vstupem nebo přehřátím. Pro správně měření teplot by se mělo dodržet zapojení podle katalogového listu.



Obr. 3.7 Typické zapojení měření teploty [převzato 20]

### 3.1.3 Napájení systému

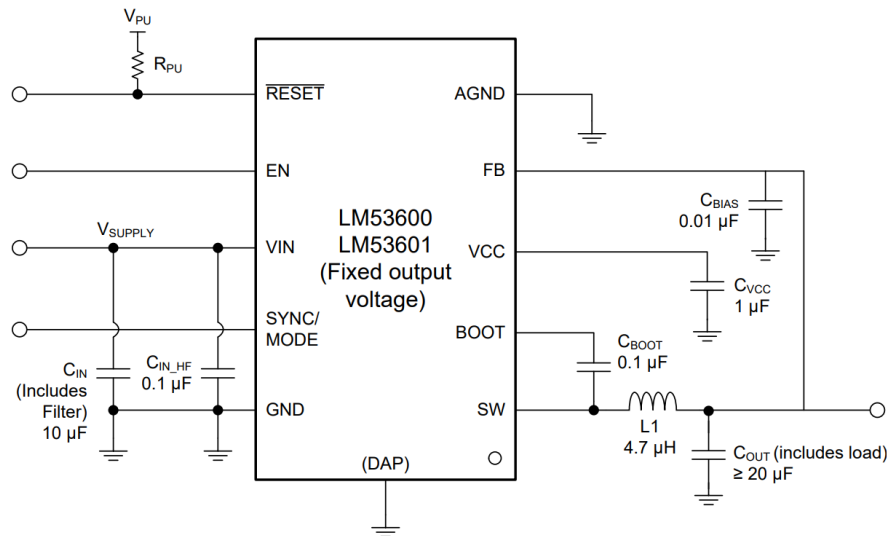
Napájení je rozděleno do tří kategorií, podle velikosti napětí:

- **Zdroj napětí +12V**
- **Zdroj napětí +5V**
- **Zdroj napětí +3V3**

#### 3.1.3.1 Zdroj napětí +12V

Spínaný regulátor s výstupním napětím  $U_{out} = 12\text{ V}$  je primárně určený pro napájení dvou nezávislých ventilátorů a napětím na vstupech spínaných zdrojů. Hlavní důvod použití zdroje napětí  $U_{out} = 12\text{ V}$  je z důvodu ventilátorů. Při použití 6 bateriových článků je jejich maximální napětí okolo  $U_{in\_6} = 25\text{ V}$  a při 12 bateriových článků může výsledné napětí dosáhnout až  $U_{in\_12} = 50\text{ V}$ . Z tohoto důvodu by musely být použity zdroje napětí dimenzované až na  $U_{in} = 60\text{ V}$  (napětí 12 článků + rezerva).





Obr. 3.9 Typické zapojení regulátoru LM53600 [převzato 22]

### 3.1.3.3 Zdroj napětí +3V3

Spínaný regulátor s výstupním napětím  $U_{out} = 3V3$  slouží k napájení desky *BMS\_P*, která je určena na řízení celého systému. Napájí části jako je mikrokontrolér, paměť *EEPROM*, měření a podobně. Byl vybrán obvod *LM536013QDSXTQ1*, který je totožný s regulátorem na napětí  $U_{out} = 5V$  a je zobrazen na Obr. 3.9. Jejich vlastnosti, pouzdro a zapojení jsou tedy totožné. [22]

### 3.1.4 Mikrokontrolér

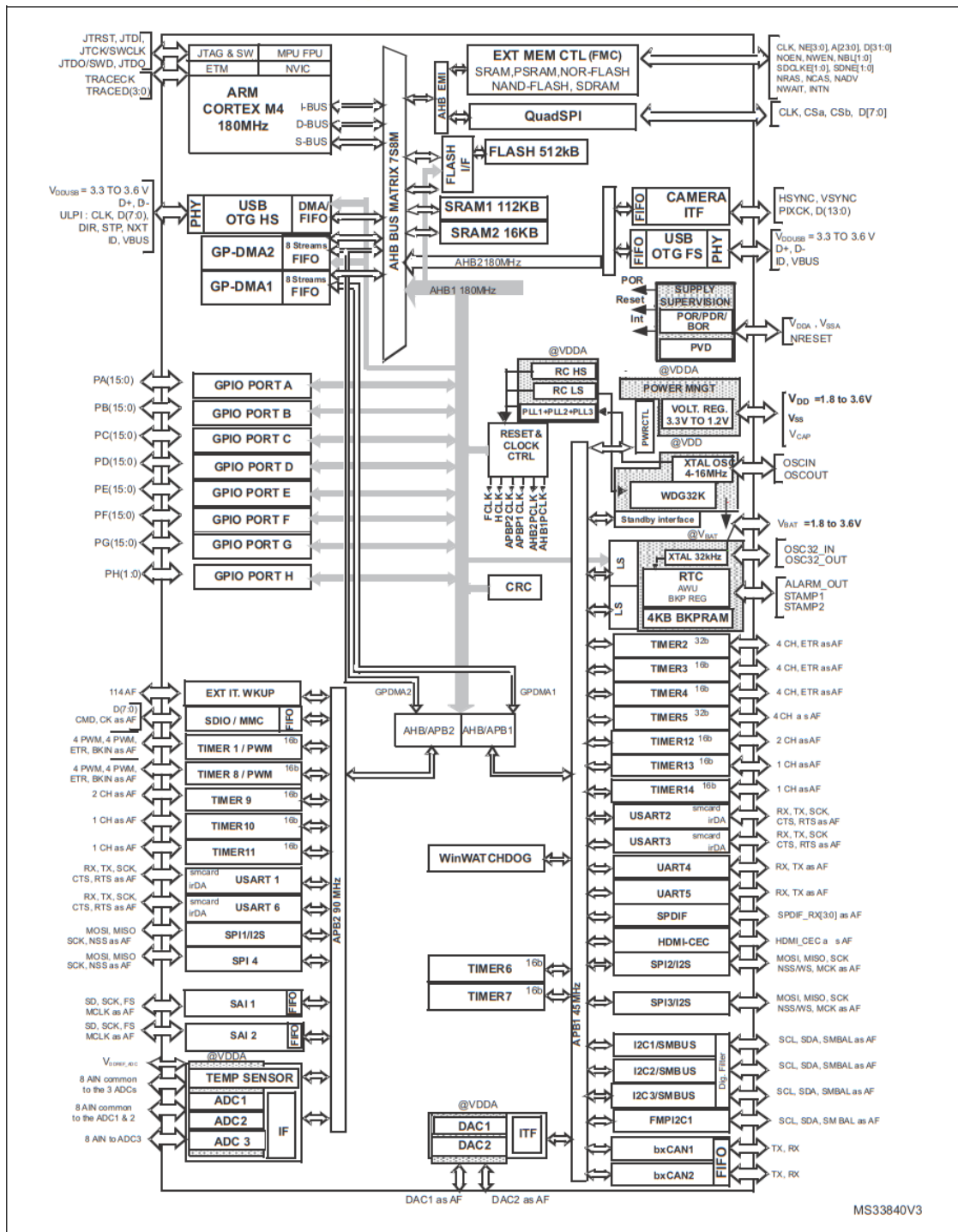
Mikrokontrolér řídí, komunikuje a ovládá celý systém. Zajišťuje komunikaci mezi jednotlivými deskami a integrovanými obvody. Komunikuje například s obvodem *ISL* určený na pasivní balancování, paměti *EEPROM*, obvodem *LTC* pro aktivní balancování, mikrokontrolérem umístěným na desce *DOK* a s nadřazeným systémem.

Volba mikrokontroléru *STM32F446xx* byla na základě potřebné komunikace, dostatečného množství vstupních/výstupních, analogových a digitálních pinů. Mikrokontrolér byl zvolen od společnosti *STMicroelectronics*. Jedná se o 32 bitový mikrokontrolér založený na *ARM Cortex M4* jádře. Použitý typ je 64 pinový v pouzdře *LQFP64* s 50 piny použitelných jako *GPIO*. Mikrokontrolér má 3x *SPI*, 1x *CAN* interface (2.0 B Active) a 4x *UART*. Dále má tři 12 bitové *AD* převodníky každý s 16 kanály. *CPU* může být taktováno až na 180 MHz. Napětí, při kterém dokáže pracovat musí být minimálně 2 V a maximálně 3,6 V. Pracovní tep-

lota je v rozsahu od  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Velikost RAM paměti je u tohoto typu 128 kB, flash paměť pak 256 kB. [23]

### 3.1.4.1 Blokové zapojení mikrokontroléru

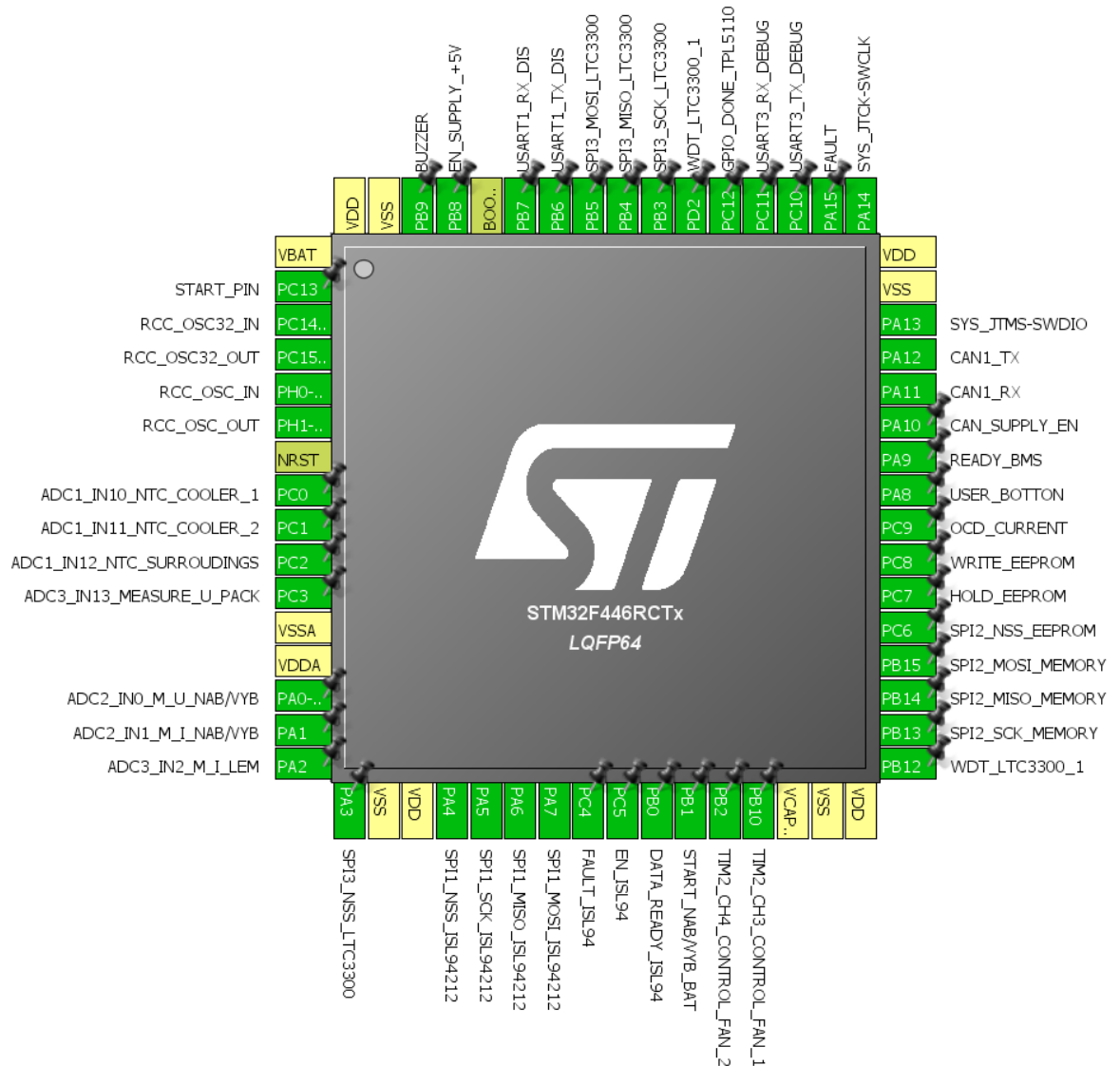
Vnitřní blokové zapojení mikrokontroléru STM32F446 uvedený na Obr. 3.10.



Obr. 3.10 Blokové zapojení mikrokontroléru STM32F446 [převzato 23]

### 3.1.4.2 Zapojení mikrokontroléru

Zapojení mikrokontroléru (Obr. 3.11) je vygenerováno pomocí programu *STM32CubeMX* od společnosti STMicroelectronics, která mikrokontroléry vyrábí.



Obr. 3.11 Zapojení mikrokontroléru STM32F446 na desce BMS\_P

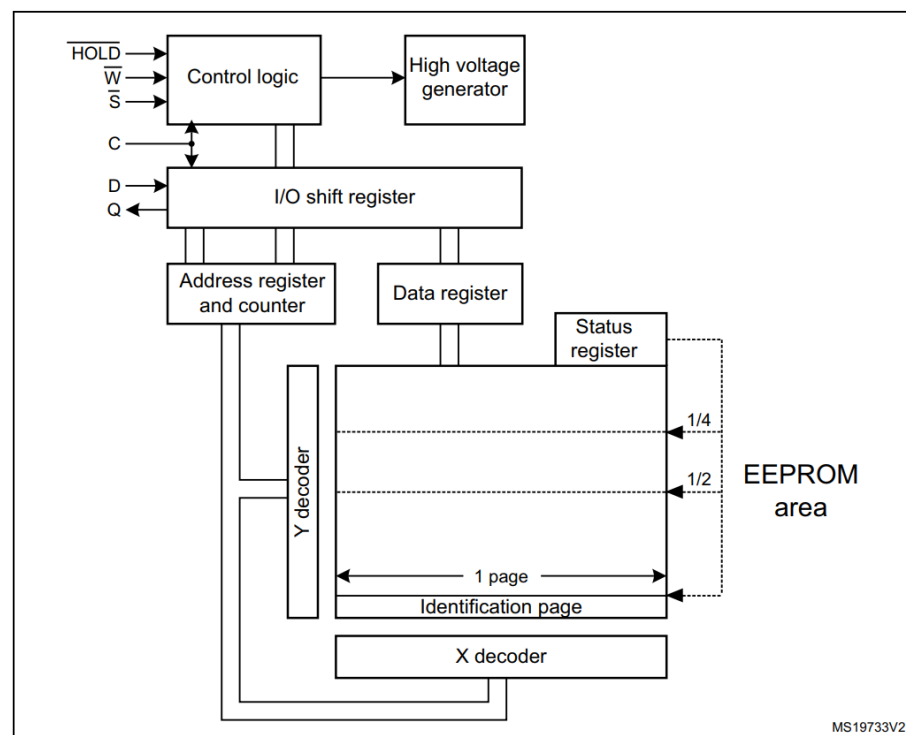


### 3.1.5 EEPROM

Paměť *M95M02* je použita z důvodu ukládání dlouhodobých dat. Paměť byla vybrána na základě velikosti datového úložiště, spotřeby, dostupnosti a ceny. Paměť komunikuje s mikrokontrolérem pomocí *SPI* komunikace. Na Obr. 3.12 je uvedeno blokové zapojení paměti. [24]

Vlastnosti:

- Napájecí napětí je 1.8 až 5.5 V
- Datové úložiště je 2 Mb
- Malý klidový proud
- Hodinová frekvence 5 MHz
- Počet zapisovacích cyklů je více než 4 milióny



Obr. 3.12 Blokové zapojení paměti M95M02 [převzato 24]

### 3.1.6 Měření veličin

Pro vyhodnocování stavu akumulátorů je potřeba měřit různé veličiny, na jejich základě se akumulátory budou řídit.

Měření je rozděleno na tři kategorie:

- *Měření napětí*
- *Měření proudu*
- *Měření teplot*

#### 3.1.6.1 Měření napětí

Měření napětí je provedeno pomocí operačních zesilovačů typu *MCP6V31*, nikoliv pomocí obvodu *ISL94212*, které měří jednotlivé články. Měří se dvě napětí. Jedno měří napětí celého *aku-packu*, nebo-li vstupní napětí systému. Druhé měří napětí zdroje. Měření na *aku-packu* je použito pro kontrolu a bezpečnost, protože obvod *ISL* umí měřit jednotlivé články, není těžké je sečíst a výsledné napětí je právě vstupní napětí nebo-li napětí *aku-packu*. Kdyby obvod *ISL* měřil z nějakého důvodu špatně, mohlo by dojít k nesprávnému řízení akumulátorů. Do systému lze přivést požadované napětí pro nabíjení akumulátorů a sepnout dva oddělující tranzistory a akumulátory nabíjet přes desku. Proto je nutné znát toto napětí a porovnat ho s napětím *aku-packu*. Když napětí na zdroji bude vyšší než na akumulátorech, je možné tranzistory sepnout a články tak nabíjet.

#### 3.1.6.2 Měření proudu

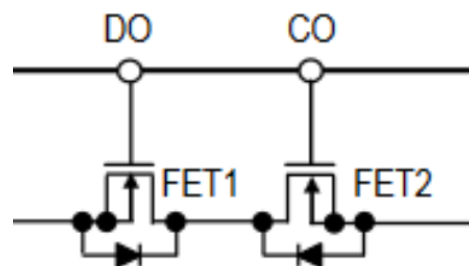
Měření proudu je důležité pro výpočet kapacity akumulátorů. Měří se opět dva proudy, kdy jedno měření je přímo dané na desce a druhé je přes konektor vyvedeno ven z desky. Měření umístěné na desce je pro měření proudu dodaného ze zdroje, s kterým lze akumulátory nabíjet. Lze ale i místo zdroje připojit zátěž a měřit tak proud odebraný zátěží. Z důvodu velikosti desky nebylo možné dimenzovat cesty vedoucí na desce na velké proudy, jsou dimenzované na  $I = 10 \text{ A}$ . Proto bylo nutné přidat druhé měření (externí), které bude měřit větší nabíjecí/vybíjecí proudy. Měření proudu je realizováno pomocí proudového převodníku, který je průvlakový. Použitý převodník je od společnosti *LEM* typu *SP33-1106*. Lze zvolit převodníky na proud  $I = 50 \div 250 \text{ A}$ .

### 3.1.6.3 Měření teplot

Další potřebné měření pro správný chod systému a kontrolu akumulátorů je měření teplot. Obvod *ISL94212* sice teploty měří (viz text výše), ale měří jen teploty mezi akumulátory. Je potřebné měřit i teplotu uvnitř boxu a teploty na chladičích při použití výkonových rezistorů. Měření teplot je z důvodu provozní schopnosti systému. Teploty nesmí přesahovat hodnoty uvedené v katalogových listech součástek. Měření teplot je pomocí *NTC* termistorů. Je zde použito více typů. Jedny *NTC* termistory jsou použity na měření teploty baterií, jiný na měření teploty uvnitř boxu a další na měření teplot na chladičích. Při vzrůstu teploty na chladičích se zapne aktivní chlazení pomocí ventilátorů, aby nedošlo k poškození výkonových rezistorů.

### 3.1.7 Nabíjení a vybíjení

Jelikož lze nabíjet/vybíjet akumulátory přes desku *BMS\_P*, je potřeba připojený zdroj řídit. Potíž je u *MOSFET* tranzistorů, které mají diodu mezi  $U_{DS}$  (Obr. 3.13). Aby bylo možné řídit tok proudu oběma směry, je potřeba mít v systému dva tranzistory, které mají diody dané proti sobě, viz obrázek 25. Tranzistory jsou řízené z mikrokontroléru *STM32F446*. Obvod je dimenzovaný na maximální proud  $I_{max} = 10\text{ A}$ . To je použito pro malé nebo střední akumulátory, které lze nabíjet přímo přes desku *BMS\_P*.

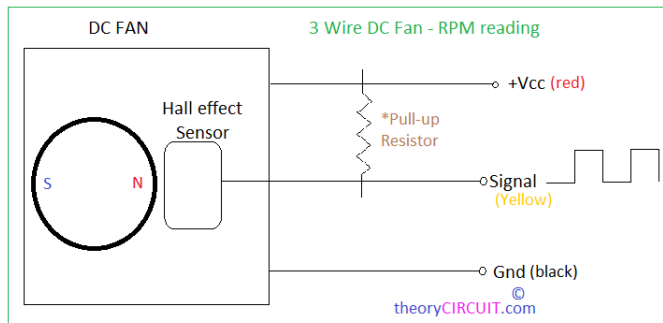


Obr. 3.13 Zapojení dvou MOSFET tranzistorů proti sobě [převzato 25]

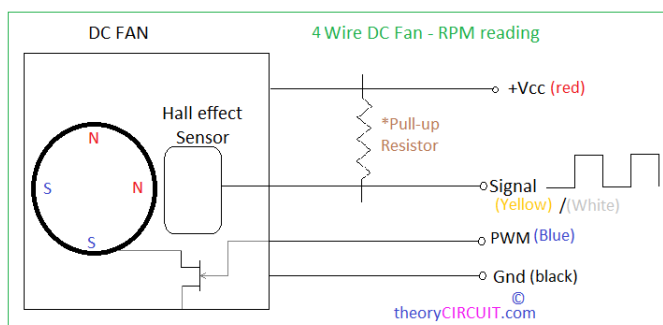
### 3.1.8 Ovládání ventilátorů

Jsou použity dva nezávisle ovládané ventilátory, které jsou řízené pomocí *PWM* modulační přivedené z mikrokontroléru. Otáčky ventilátorů jsou závislé na měření teplot na chladičích, které jsou použity pro chlazení výkonových rezistorů. Ventilátory tak budou aktivně přispívat k jejich ochlazení. Napájecí napětí použitých ventilátorů je  $U = 12\text{ V}$ .

Ventilátory jsou děleny kromě napěťové úrovně a průtoku vzduchu na 2-drátové, 3-drátové, 4-drátové viz Obr. 3.14 a Obr. 3.15. Zde jsou použity pro jednoduchost 2-drátové, mají jenom dva vodiče (*VCC* a *GND*). Je to z důvodu nedostatku volných pinů na mikrokontroléru. Ventilátory více vodičové mají navíc kontrolu otáček a řízení pomocí *PWM* modulace. Dvou-drátové ventilátory jsou řízené, tak že se jim ovládá napájecí napětí *VCC*. Ventilátor lze takto řídit, ale výrobci to většinou nedoporučují.



Obr. 3.14 Zapojení ventilátorů s hlídáním otáček [převzato 26]

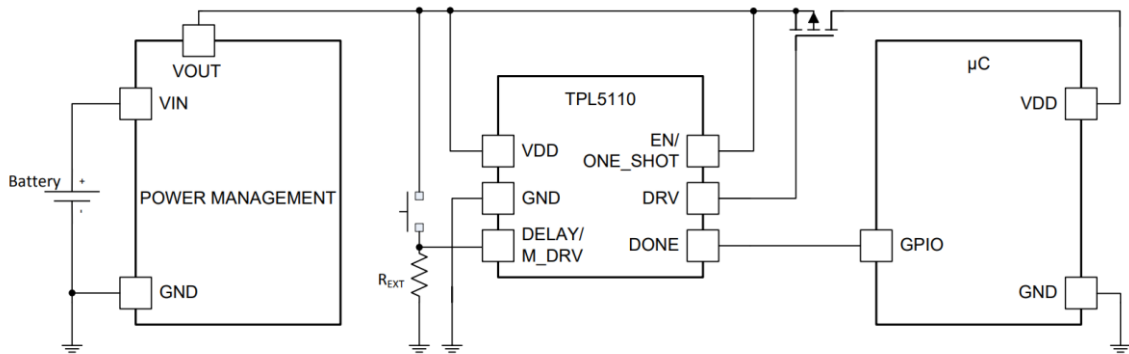


Obr. 3.15 Zapojení ventilátorů s hlídáním otáček a řízením pomocí PWM [převzato 26]

### 3.1.9 Obvod TPL5110

Použití obvodu *TPL5110* v systému je za účelem skladového režimu (viz kapitola *Druhy provozních režimů*). V běžném provozu se obvod neuplatní a bude tak nepoužitý. Obvod dále obsahuje „knoflíkovou“ baterii typu *CR2032*, pro napájení vnitřních hodin a tranzistor pro přivedení napětí z knoflíkové baterie na vstup tranzistoru pro sepnutí napájení celého systému. Jak je naznačeno na Obr. 3.16. Tranzistor je ovládán přímo z obvodu *TPL5110*. Nakonec je použita dioda zabraňující nabíjení „knoflíkové“ baterie ze spínaného zdroje. Je to z důvodu toho, že knoflíková baterie by musela být hlídána, to znamená *BMS* systémem. To je zbytečně složité a není to potřeba, protože se jedná o skladový režim, v běžném provozu se tento obvod neuplatní. Dále by bylo potřeba změnit typ knoflíkové baterie pro nabíjení a ta už je cenově

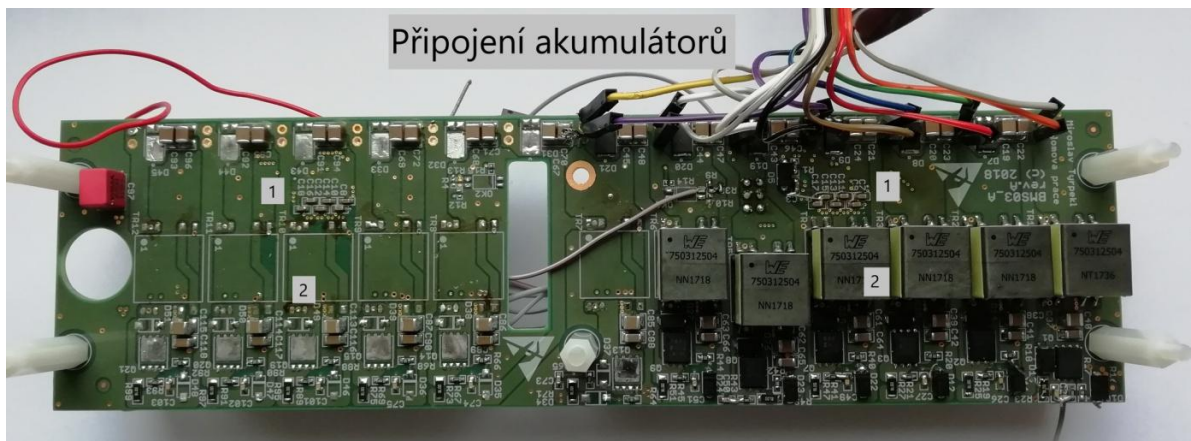
dražší než obyčejná. Obvod umožňuje pomocí rezistoru  $R_{EXT}$  nastavení času pro probuzení. Časy se pohybují od  $100\text{ ms}$  do  $2\text{ h}$  v závislosti na velikosti rezistoru  $R_{EXT}$ . [27]



Obr. 3.16 Zapojení TPL5110 [převzato 27]

### 3.2 Deska plošného spoje BMS\_A

Deska plošného spoje *BMS\_A* (Obr. 3.17) je určena pro aktivní balancování. Systém, jak už bylo řečeno, může pracovat bez této desky, kde by se využilo jen pasivní balancování. Deska s aktivním balancováním je spojena pomocí komunikace *SPI* a konektory na připojení jednotlivých akumulátorů s deskou *BMS\_P*. Návrh desky s aktivním vyvažováním je z důvodu použitého systému pro různé kapacity akumulátorů. Dalším důvodem je velká možnost účinného řízení vyváženosti akumulátorů.



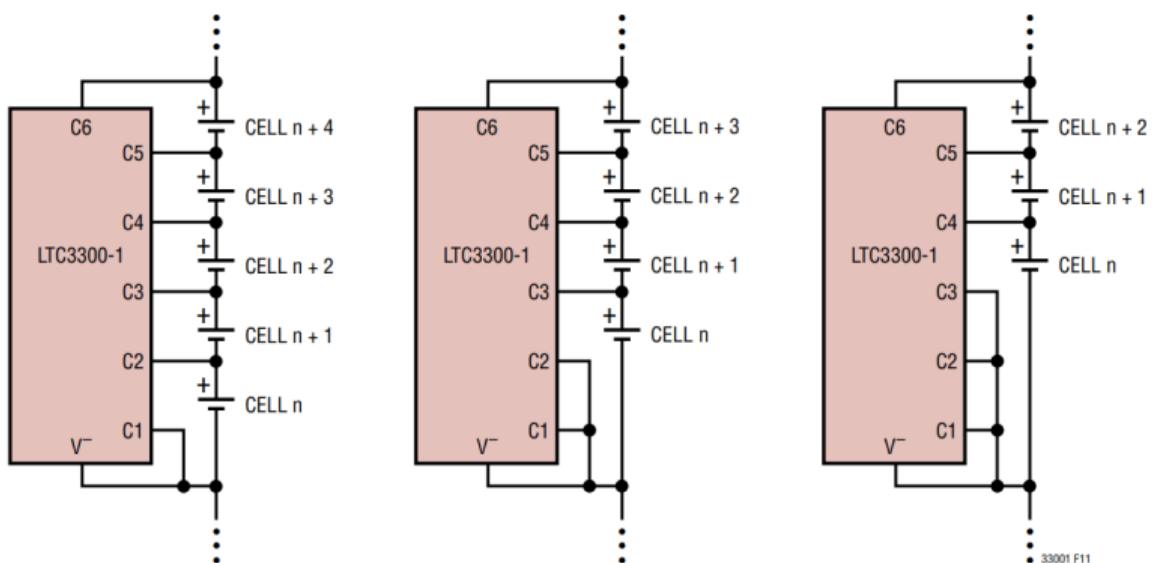
Obr. 3.17 Jednotka BMS\_A

Deska plošného spoje *BMS\_A* se skládá ze dvou hlavních částí, které jsou označeny čísly na Obr. 3.17:

- 1) *Integrovaný obvod LTC3300 (na druhé straně DPS)*
- 2) *Balancovací obvod*

### 3.2.1 Integrovaný obvod LTC3300

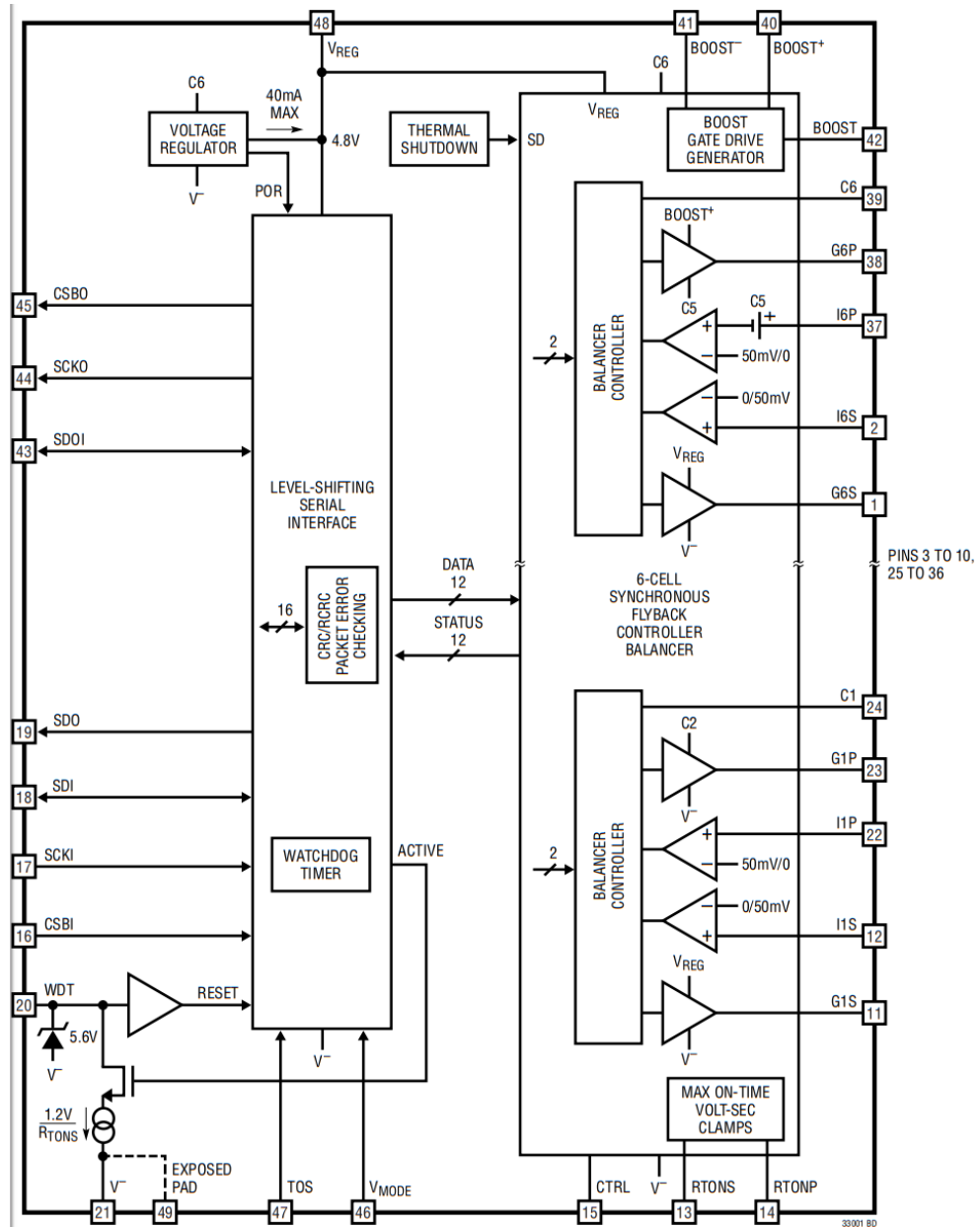
Integrovaný obvod *LTC3300* umí ovládat 3 až 6 článků. Je tedy nutné pro řízení 12 článků použít dva obvody. Na rozdíl od integrovaného obvodu *ISL94212* se při snížení počtu článků nezapojují od středu, ale odspodu, jak je ukázáno na Obr. 3.18. Pro spojení více *LTC* obvodů je zapotřebí komunikace mezi jednotlivými obvody. To je řešeno pomocí takzvaného „*Daisy Chain*“. Potom první, nebo-li nejspodnější obvod, je spojen pomocí komunikace *SPI* s nadřazeným systémem. Komunikaci *SPI* je zapotřebí galvanicky oddělit z důvodů rozdílných napěťových hladin, to je provedeno pomocí izolátoru *MAX14851*. [28]



Obr. 3.18 Připojení tří až šesti článků [převzato 28]

Vnitřní zapojení obvodu *LTC3300* je na Obr. 3.19. Obvod umožňuje výběr mezi dvěma typy oddělovacích transformátorů. Dá se použít jeden transformátor, který má jednu sekundární stranu a více primárních odboček. Nebo můžeme použít jednotlivé transformátory pro každý akumulátor. To lze nastavit pomocí pinu s názvem *CTRL*. Pomocí rezistorů  $R_{TONP}$  a  $R_{TONS}$  se nastavuje maximální doba otevření *MOSFET* tranzistorů na primární a sekundární straně, aby nedošlo ke zkratovému proudu. Obvod dále hlídá svoji vnitřní teplotu, aby nepřesáhla povolené meze určené výrobcem. Dále se pomocí pinu  $V_{MODE}$  a  $T_{OS}$  povoluje nebo zakazuje komunikace „*Daisy Chain*“ pro další *LTC* obvod. Pin  $W_{DT}$  hlídá, jestli jsou data přijata po komunikaci validní, na základě toho vypíná nebo povoluje balancéry. Pin je veden jako výstup, který je přes izolátor veden do mikrokontroléru. Pin  $W_{DT}$  je ignorovaný, když je spojený s pinem  $V-$ , který reprezentuje zem. Pomocí napětí  $V_{REG} = 4,8 V$ , který si obvod *LTC*

vytváří, je možné napájet izolovanou stranu oddělovače pro SPI komunikaci. Piny označené jako *BOOST* se používají z důvodu nábojové pumpy pro otevření nebo zavření horních tranzistorů. Rychlost SPI komunikace je až 1 Mbps. Pouzdro je 64 pinové typu LQFP48.

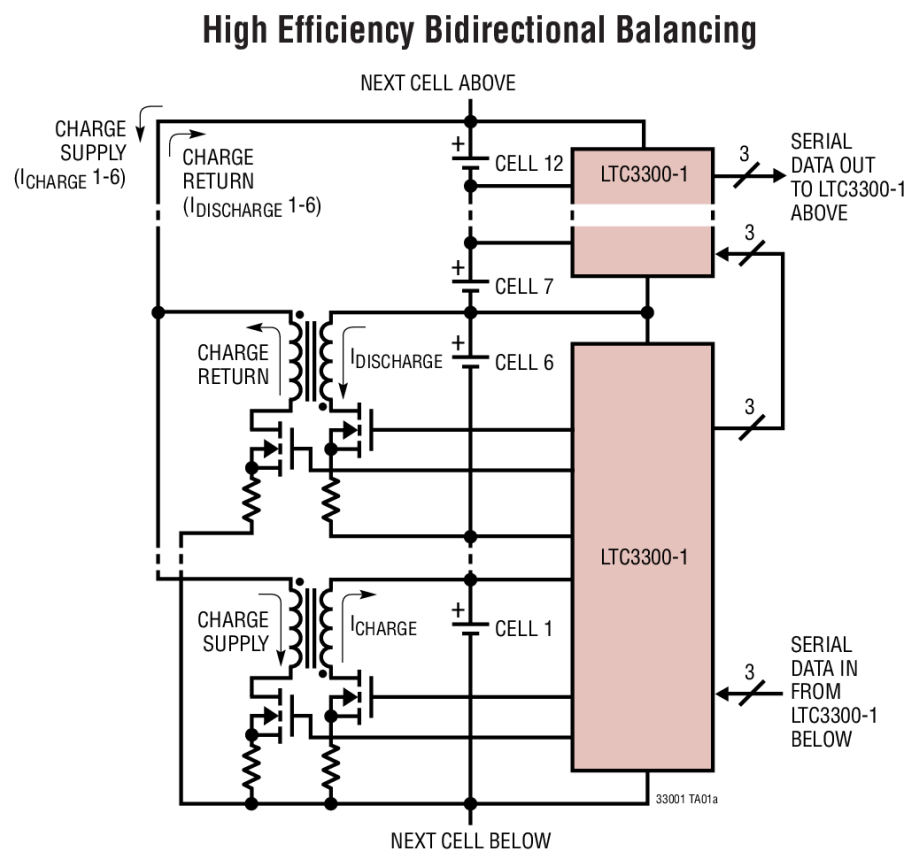


Obr. 3.19 Vnitřní zapojení obvodu LTC3300 [převzato 28]

### 3.2.2 Balancovací obvod

Balancovací obvod zobrazený na Obr. 3.20 umí oba směry toku energie. To znamená, že jednu baterii vybíjí do celé soustavy (tedy do šestice článků) a zároveň druhou ze šestice nabíjí. Je to tedy systém extrémně účinný na rychlé vyrovnání baterií. Přenášená energie je za

pomocí transformátorů, které jsou ovládané tranzistory, jak na primární straně, tak i na sekundární straně. Je to opět z důvodu obousměrného řízení energie. Tranzistory jsou řízené různými frekvencemi podle toho, jestli jsou na primární nebo sekundární straně transformátoru. V katalogovém listu je doporučeno, jaké typy transformátorů použít. Dále pomocí malých rezistorů označovaných jako „šanty“ lze měřit proud na sekundární i primární straně transformátoru. Obvod neumí měřit napětí na jednotlivých článcích, je tedy potřeba je měřit jinak. To je zprostředkováno pomocí obvodu *ISL94212*, který má přesnost měření  $\pm 10\text{ mV}$  na jednotlivý článek.

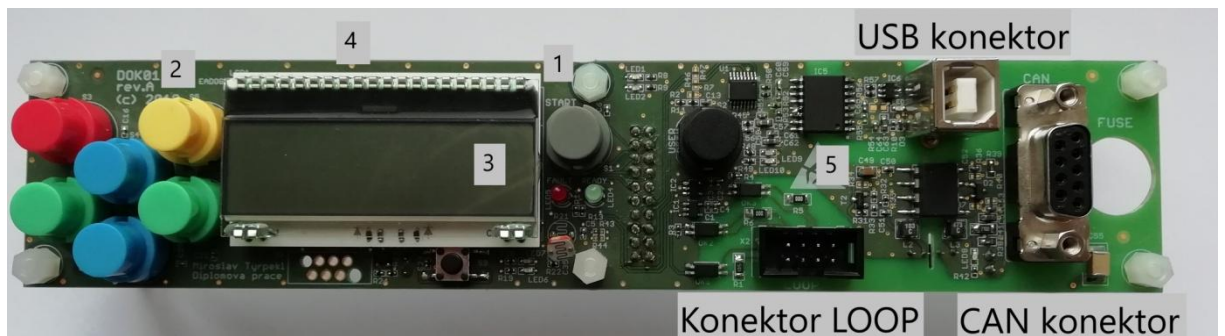


Obr. 3.20 Zapojení aktivního balancovacího obvodu [převzato 28]



### 3.3 Deska plošného spoje DOK

Deska plošného spoje *DOK* (Obr. 3.21) je určena pro komunikaci s nadřazeným systémem, k zobrazení veličin na displeji a k ručnímu ovládnání systému. Systém by bylo možné řešit bez uvedené desky. Uživatel by ale nedokázal komunikovat, zobrazovat a ani ovládat systém. Deska tedy neřídí ani neměří akumulátory, je pouze pro komunikaci.



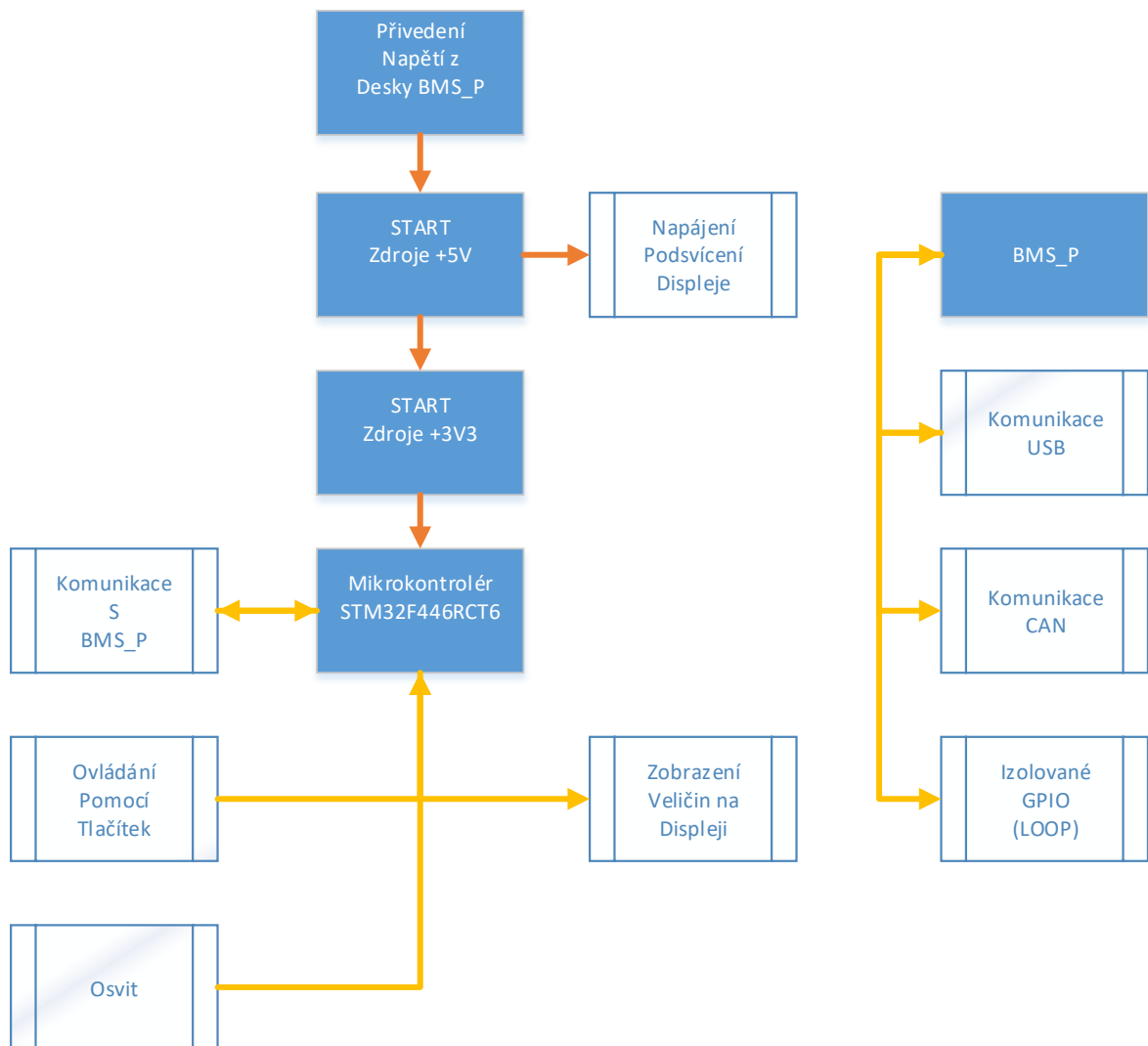
Obr. 3.21 Jednotka DOK

Deska plošného spoje *DOK* se skládá z pěti hlavních částí, které jsou označeny čísly na Obr. 3.21:

- 1) *Napájení (pod displejem)*
- 2) *Ovládnání*
- 3) *Displej*
- 4) *Mikrokontrolér a jeho části (pod displejem)*
- 5) *Komunikace*

#### 3.3.1 Blokový diagram jednotky DOK

Jednotka *DOK* obsahuje mikrokontrolér *STM32F446*, lineární stabilizátor, displej, tlačítka pro ovládnání a komunikace s nadřazeným systémem jako je *CAN*, *USB* a *LOOP*. Na Obr. 3.22 Obr. 3.3 je znázorněn blokový diagram jednotky *DOK*.



Obr. 3.22 Blokový diagram jednotky DOK

### 3.3.2 Napájení

Na desku *DOK* je přiváděno napájecí napětí o velikosti  $U = 5\text{ V}$ . Pro činnost mikrokontroléru a dalších obvodů je potřeba velikost napětí upravit na  $U = 3\text{ V3}$ . Dále je potřeba galvanicky oddělit *CAN* komunikaci, proto je použit oddělovací převodník stejnosměrného napětí.

#### 3.3.2.1 Napájení systému

Jak už bylo popsáno v kapitole *Zdroje systému* u desky *BMS\_P*, je zde přiváděno napájecí napětí o velikosti  $U = 5\text{ V}$ . Tato velikost napětí je zapotřebí pouze pro napájení podsvícení displeje. Zbytek obvodů vyžaduje napájení o velikosti  $U = 3\text{ V3}$ . Toho je docíleno za pomoci lineárního stabilizátoru typu *SPX1117*. Má pevné výstupní napětí definované na  $U = 3\text{ V3}$  a výstupní proud je  $I_{max} = 800\text{ mA}$ . [29]

### 3.3.2 Napájení CAN komunikace

Pro izolování celého systému od jiných zařízení je zapotřebí galvanicky oddělit i komunikace. Kdyby se připojilo více BMS systémů na neizolovanou CAN sběrnici, došlo by vlivem rozdílných úrovní napětí ke zkratu mezi jednotlivými systémy BMS. Jelikož lze BMS systém spojovat přes komunikaci CAN, lze tak řídit až 384 akumulátorů. Komunikace CAN zvládne 32 připojených uzlů na sběrnici a každý systém BMS dokáže ovládat 12 akumulátorů.

Komunikace CAN je oddělena pomocí zvyšujícího DC/DC zdroje typu CREIS0305. Vstupní napětí je o velikosti  $U_{IN} = 3V3$  a výstupní izolované napětí má velikost  $U_{OUT} = 5V$ . Maximální proud schopný DC/DC zdroj dodat do obvodu je  $I_{MAX} = 200mA$ . Dále zdroj má definovanou minimální zátěž pro dobrý běh systému. Měnič musí být zatížen 10 % jeho maximálního jmenovitého proudu a to  $I = 20mA$ . Zdroj DC/DC je defaultně zapnut, lze ho pomocí mikrokontroléru vypnout. Tento pin nese název EN\_ISOSUP. Toto opatření je z důvodu snížení spotřeby, když není nutné napájet izolovanou stranu sběrnice, popřípadě není potřeba CAN komunikace. [30]

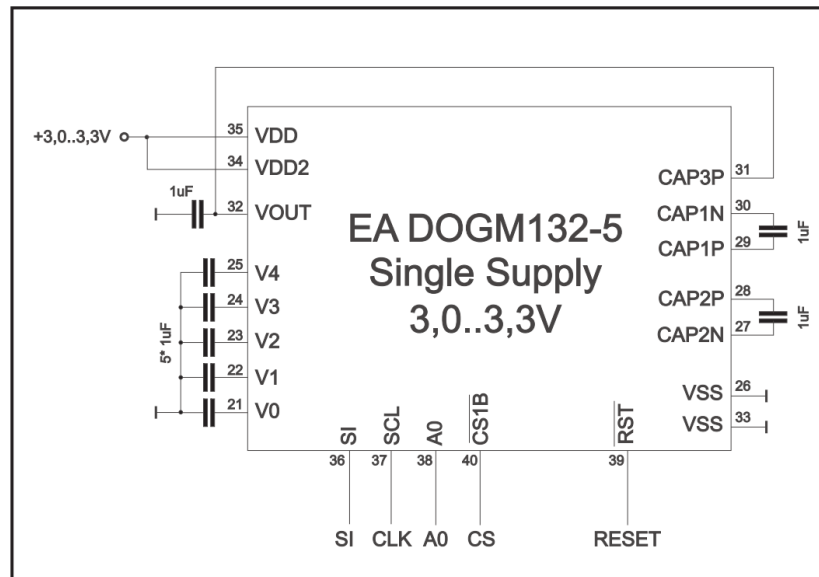
### 3.3.3 Ovládání

Systém se ovládá pomocí tlačítek. Jsou zde použita tlačítka na ovládání displeje, popřípadě nastavení parametrů systému. Dále je použito tlačítko na probuzení, které sepne a přivede napětí na vstup spínaného obvodu a tím celý systém probudí. Poslední tlačítko je nazvané USER. Toto tlačítko lze libovolně nastavit pomocí SW. Je totiž přivedeno do mikrokontroléru umístěného na spodní desce BMS\_P.

### 3.3.4 Displej

K displeji lze použít podsvícení, které se musí k displeji připájet. Displej byl vybrán typu EADOGMI32-5 pro jeho rozměry, možnost grafického vykreslování, komunikaci pomocí SPI a jeho nízkou spotřebu. Zapojení displeje je zobrazeno na Obr. 3.23. Díky nízké spotřebě se displej hodí pro aplikace napájené z akumulátorů. Mikrokontrolér řady STM32 komunikuje s displejem pomocí SPI komunikace. Podsvícení pod displej je více druhů, můžeme si vybrat s čistě bílým podsvícením, modrým (použito zde) nebo třeba RGB. Jas podsvícení se reguluje pomocí tranzistoru, který je ovládán PWM modulací z mikrokontroléru. Podsvícení displeje lze regulovat v závislosti na externím fotorezistoru. U podsvícení RGB je zapotřebí tří tranzis-

torů, které řídí jednotlivé barvy. Na rozdíl od ostatních, kde je potřeba řídit jen jednu barvu. [31]



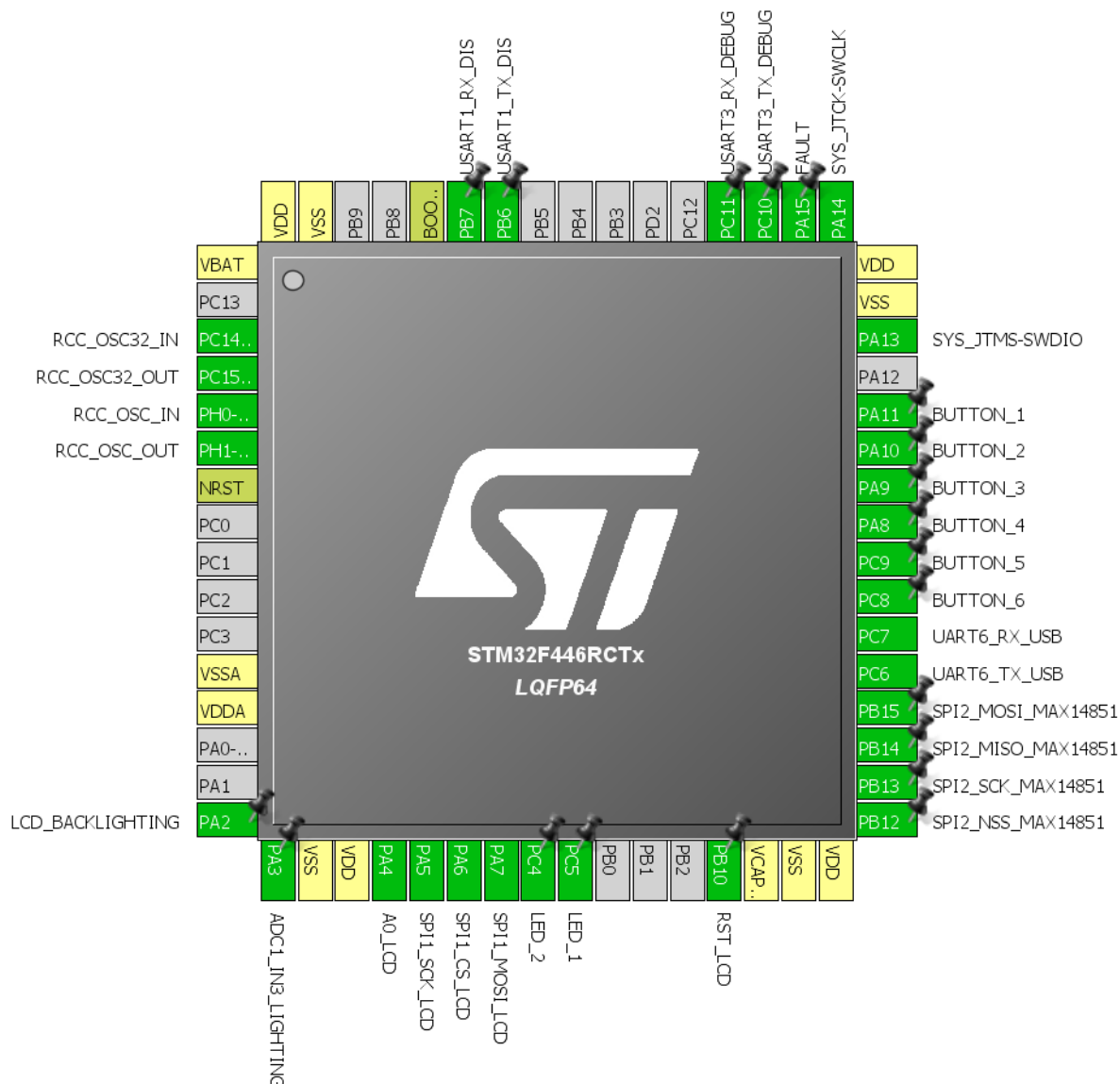
Obr. 3.23 Zapojení displeje EADOGM132-5 [převzato 31]

### 3.3.5 Mikrokontrolér

Mikrokontrolér zajišťuje komunikaci mezi displejem a mikrokontrolérem na spodní desce *BMS\_P*. Dále řídí osvit podsvícení pomocí fotorezistoru a obsluhuje tlačítka, s kterými si lze navolit různé funkce. Mikrokontrolér na desce *DOK* je spojen sériovou komunikací *UART* s mikrokontrolérem na desce *BMS\_P*. Spodní mikrokontrolér posílá naměřené veličiny, kde horní je zobrazuje na displeji. Použitý mikrokontrolér je stejný jako na desce *BMS\_P* zobrazený na Obr. 3.10. Proto zde není uveden jeho podrobný popis. [23]

#### 3.3.5.1 Zapojení mikrokontroléru

Zapojení mikrokontroléru (Obr. 3.24) je vygenerováno pomocí programu *STM32CubeMX* od společnosti *STMicroelectronics*.



Obr. 3.24 Zapojení mikrokontroléru STM32F446 na desce DOK

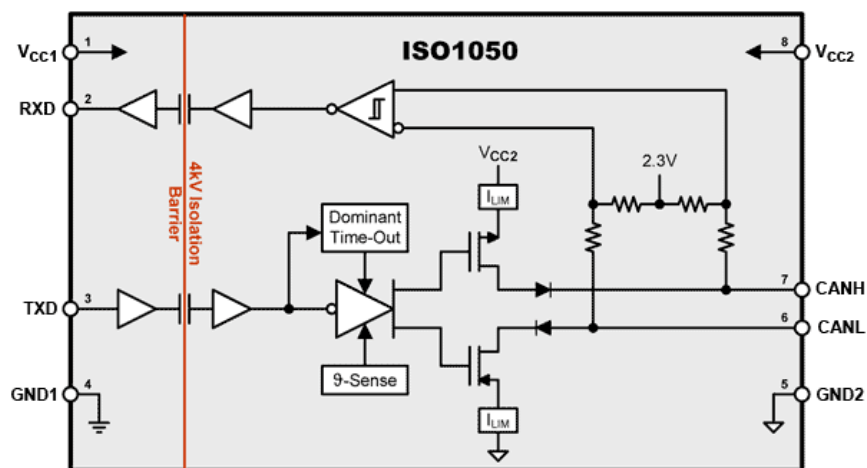
### 3.3.6 Komunikace s dalším systémem

Komunikace zajišťuje spojení s jinými systémy. Ať už jde o spojení více *BMS* systémů, nebo komunikaci s nadřazeným systémem. To může například být nabíječka na akumulátory, nebo spojení s počítačem pro zobrazování a diagnostiku veličin.

### 3.3.6.1 CAN komunikace

Komunikaci CAN zajišťuje galvanicky izolovaný budič typu *ISO1050* zobrazen na Obr. 3.25. U budiče pro komunikaci CAN je použit zvyšující *DC/DC* měnič, který je popsán v kapitole *Zdroje napětí*. Obvod budiče sběrnice CAN je galvanicky oddělený. Z jedné strany je napájen lineárním stabilizátorem a pro izolovanou stranu slouží k napájení výše popsáný spínaný zdroj. Komunikace CAN bus funguje na velké vzdálenosti (až kilometr). Se zvyšující se vzdáleností klesá rychlost komunikace. Rychlost komunikace na velmi krátké vzdálenosti do 40 m je až 1 Mbit/sec. V praxi se používají menší například 500 kbit/sec, a to z důvodu rušení na sběrnici.

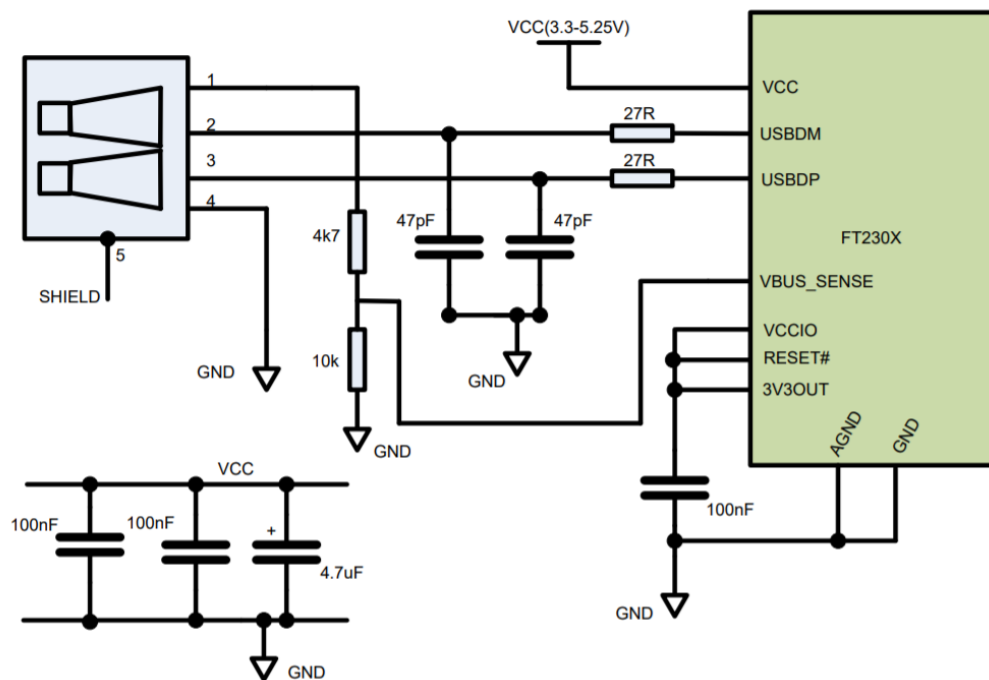
Komunikace CAN potřebuje pro dobrý stav systému terminační rezistory na koncích sběrnice. Hodnota terminačního rezistoru je definovaná  $R_{Ter} = 120 \Omega$ , které jsou v systému dva paralelně zapojené, takže výsledná hodnota rezistoru je  $R_{Ter} = 60 \Omega$ . Jednotku BMS lze použít až 32x. Aby se nemuselo na dvou deskách použitých na koncích sběrnice složitě pájet terminační rezistory, je zde použit jumper na propojení. To pak zaručuje, že se daná jednotka bude moci připojit kamkoliv do systému a pouze se odstraní nebo přidá propojka. Vývody *CAN\_H* a *CAN\_L* jsou dále chráněny proti krátkodobému *ESD* pulsu pomocí dvojitého supresoru typu *DESD2CAN2SOQ-7*. [32]



Obr. 3.25 Vnitřní struktura budiče ISO1050 pro CAN bus komunikaci [převzato 32]

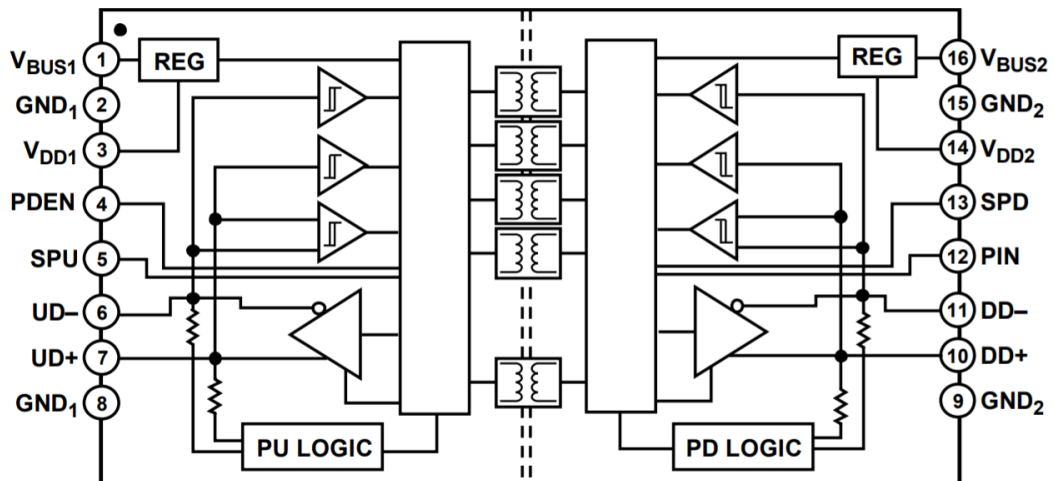
### 3.3.6.2 USB komunikace

Komunikace pomocí *USB* je použita převážně na testování popřípadě na vyčtení veličin z *BMS* systému. Komunikace *USB* je realizovaná pomocí převodníku z *UART* komunikace na *USB* typu *FT230* zobrazen na Obr. 3.26. Dále jsou signály galvanicky odděleny pomocí oddělovacího obvodu *ADUM3160*, který je zobrazen na Obr. 3.27. Je to opět z důvodu bezpečnosti, protože kabel *USB* může být pro *USB 2.0* dlouhý do 5 m. Je tedy možné, že se kabel poškodí a pak by mohl způsobit poruchu systému. Druhým důvodem je opět spojení více systémů, kde by došlo vlivem rozdílných napájecích hladin ke zkratu. Dalším důvodem je potlačení rušení. Konektor typu *B* je volen na základě průmyslových aplikací, kde se hojně vyskytuje. Pro fungování digitálního oddělovače musí být napájen ze dvou stran. Z izolované strany to může být například počítač. [33, 34]



Obr. 3.26 Zapojení převodníku FT230x [převzato 33]

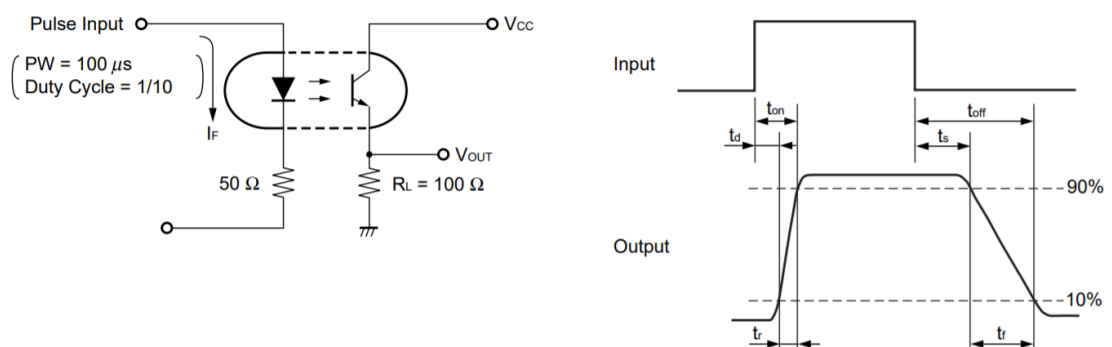
## FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



Obr. 3.27 Vnitřní zapojení obvodu ADUM3160 [převzato 34]

### 3.3.6.3 LOOP obvod

*LOOP* obvod není určen pro komunikaci jako takovou, ale spíše informuje nadřazený systém o stavu *BMS*. Jedná se o obvod, kdy při poruše by měl systém vyhodnotit takřka okamžitě jeho stav a následně odpojit nebo provést jiný úkon. Je to použito z bezpečnostních důvodů, kvůli tomu, že například *CAN* komunikace je pomalejší než *OPEN* kolektor nebo třeba bude komunikace zaneprázdněná. Přeci jen v systému nemusí být jenom jedno zařízení. V *LOOP* obvodu jsou tři optočleny typu *PS2801* (Obr. 3.28), které galvanicky oddělují systém. První optočlen se používá na probuzení systému, kdy nadřazený systém přivede napětí na diodu optočlenu a ten probudí systém *BMS*. Druhý a třetí optočlen informuje nadřazený systém o jeho stavu, jestli je připravený, nebo má poruchu. [35]



Obr. 3.28 Zapojení optočlenu typu PS2801 a jeho průběhy [převzato 35]



### 3.4 Druhy provozních režimů

System *BMS* je díky kombinaci pasivního a aktivního vyvažování velice univerzální. Dále také díky obvodům jako je *TPL5110*, který umí systém probudit, nebo obvodu pro odpínání zdroje/zátěže. Proto je velice obtížné určit provozní režimy, ve kterých by měl systém fungovat. Zde jsou určeny tři základní režimy provozu, ale je jich mnohem více.

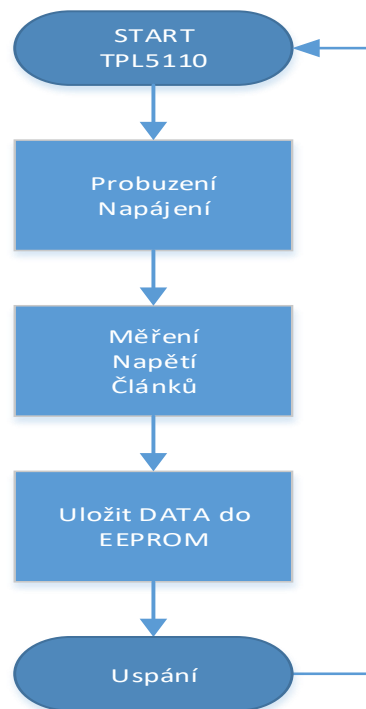
Tři základní režimy:

- ***Skladový režim***
- ***Testovací režim***
- ***Běžný provoz***

#### 3.4.1 Skladový režim

Skladový režim je zobrazený na Obr. 3.29. Jedná se o režim, kdy systém bude připojen k akumulátorům, které budou ve skladu čekat na dodání. Ve skladu mohou být akumulátory delší dobu, proto je důležité i v tomto stavu kontrolovat akumulátory. Pro dlouhodobou diagnostiku se měřené veličiny ukládají do paměti *EEPROM*. Systém bude v takzvaném režimu spánku. To znamená, že napájení systému bude vypnuto a *BMS* tak bude odebírat minimální proud okolo  $I = 20 \mu A$ . Proud je daný *ISL* obvodem, který při režimu spánku odebírá z akumulátorů okolo  $I = 10 \mu A$ . Další proudy jsou dány součástkami, například kondenzátory a jejich prosakujícími proudy. Probuzení napájení je pomocí integrovaného obvodu *TPL5110*, který je napájen z knoflíkové baterie. Obvod *TPL5110* má vnitřní hodiny, které lze nastavit externím rezistorem. Lze si tak navolit probuzení systému od několika ms až po několik hodiny.

## Skladový režim

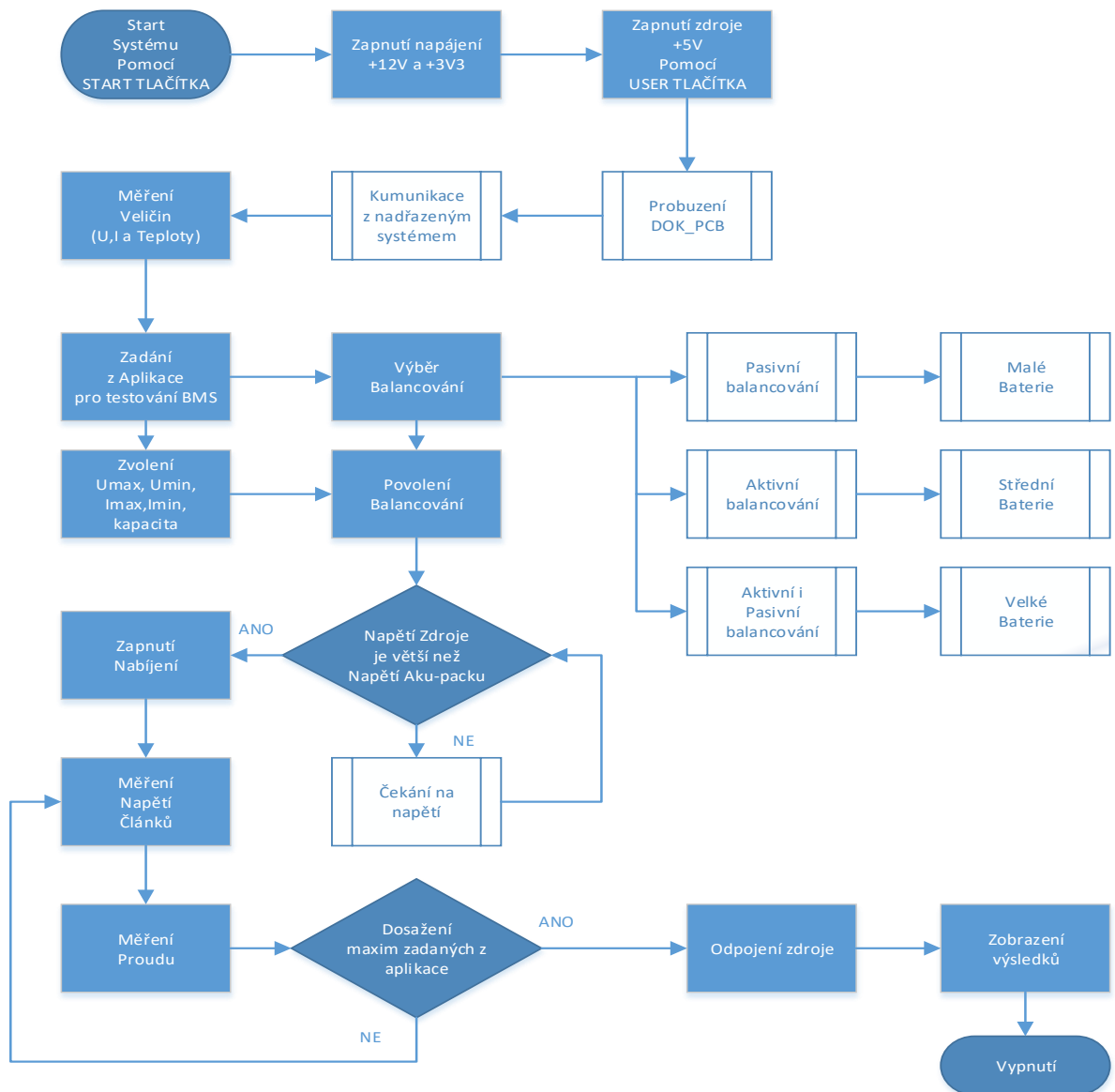


Obr. 3.29 Skladový režim

### 3.4.2 Testovací režim

Testovací režim je zde z důvodu složitosti softwaru a je zobrazen na Obr. 3.30. Diplomová práce je zaměřena pouze na hardwarový návrh. Software proto není obsahem diplomové práce. Ale pro oživení a otestování systému je potřeba softwaru. Proto bylo nutné vyvinout testovací režim. Režim *Běžný provoz* z tohoto testovacího režimu bude vycházet. Je to tedy zjednodušená verze režimu běžného. Chybí zde zcela autonomie systému. V testovacím režimu je potřeba vše si nastavit a řídit ručně pomocí speciálně vyvinuté aplikace. Lze tak snadno řídit nabíjení, vybíjení a balancování akumulátorů. Dále aplikace umožňuje vidět průběhy napětí článků a teplot.

### Testovací režim



Obr. 3.30 Testovací režim

### 3.4.3 Běžný provoz

Systém je velice složitý a je zde mnoho kombinací řízení systému. To dělá ze systému velice univerzální zařízení. V běžném provozu by měla fungovat autonomie, to znamená že systém pracuje bez pomoci uživatele. Běžný provoz je tedy velice náročný na software. Je zde ještě zapotřebí zmínit, že *BMS* lze pomocí *CAN* komunikace ovládat. Tedy je možné *BMS* zařadit do systému, kde nadřazený systém bude určovat, které články má balancovat. Tento stav může nastat, když je v systému několik *aku-packů*. Je možné, že napětí na jednotlivých

akumulátorech budou stejná, ale proti jinému *aku-packu* budou hladiny napětí rozdílné. Proto je zapotřebí, aby jednotlivé *BMS* systémy vyvažovaly všechny akumulátory, aby se hladiny v celém systému srovnaly. Takový nadřazený systém může být například inteligentní *DC/DC* zdroj napájený ze solárních panelů. Dále se při běžném provozu musí určit, kdy a jak se jednotlivé balancéry budou povolovat a řídit. Například kdy bude povolováno aktivní balancování, kdy naopak jenom pasivní a za jakých podmínek budou systémy balancovat společně.

Další složitost nastává, kdy systém *BMS* lze provozovat jako samostatný celek. Kde přes konektor lze akumulátory nabíjet a zároveň přes stejný konektor akumulátory vybíjet. Systém by si sám určoval, kdy jsou akumulátory nabity. Pomocí tlačítka *USER* by se mohlo zapínat/vypínat zátěž. Systém by byl tedy zcela soběstačný.

Z důvodu složitosti systému nazvaným *Běžný provoz* zde není uveden vývojový diagram. Diagram by byl velice složitý a nepřehledný, kdyby měl obsahovat všechny možnosti systému. Další důvod absence vývojového diagramu je možnost pracovat v několika typech řízení. Proto vývojový diagram bude řešen až v určitém provozu pro něj určeném.

## 4 Testování návrhu BMS a akumulátorů

Návrh pasivního BMS (*BMS\_P*) byl testován na akumulátorech *LiFePO<sub>4</sub>* o kapacitě  $C = 100 \text{ Ah}$  od firmy Sinopoly. K dispozici na testování bylo 8 akumulátorů. Dále byly použity akumulátory o kapacitě  $C = 1100 \text{ mAh}$  od firmy *JYH Battery CO*. Na testování bylo k dispozici 12 akumulátorů. Na nich bylo otestováno aktivní BMS (*BMS\_A*). Celý systém BMS byl zcela otestován, ale bohužel z časové náročnosti a absence softwaru chybí autonomie systému. Testování probíhalo následovně: obvod *ISL* změřil všechny články, mikrokontrolér je seřadil pomocí klouzavého aritmetického průměru a následovně se ručně zapnulo aktivní nebo pasivní vyvažování akumulátorů.

### 4.1 Chyby při návrhu

Celý systém pro řízení akumulátorů je zobrazen na Obr. 4.1 a Obr. 4.2, kde jsou zobrazeny pohledy ze shora a ze strany.

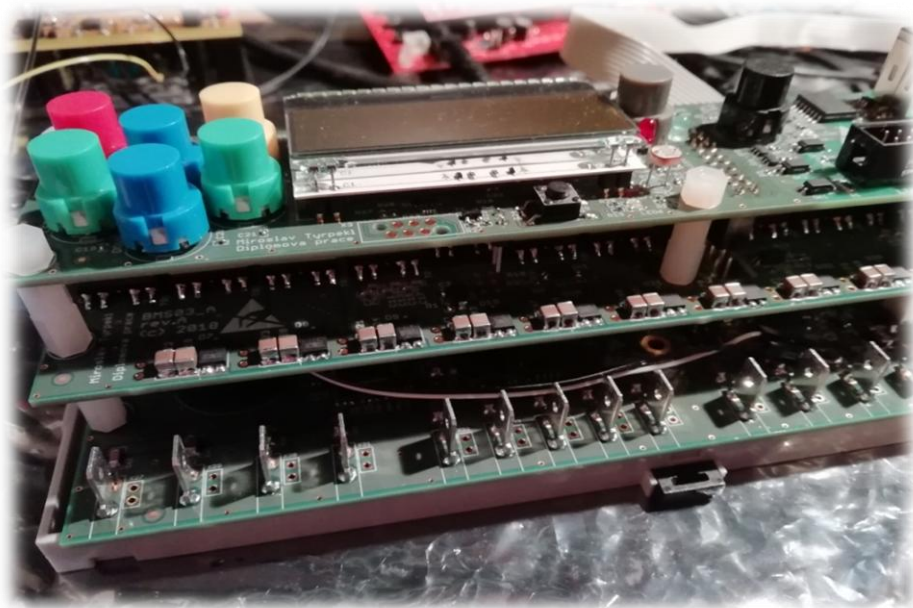
Při návrhu aktivního balancování bylo nutné navrhnout desku plošného spoje pro integrovaný obvod *LTC* s názvem *BMS\_A*. Aktivní balancování se otestovalo celé, tj. komunikace a obvod externích součástek připojených k integrovanému obvodu *LTC*. V návrhu bylo několik chyb, které vznikly nepozorností návrháře. Proto bylo nutné navrhnout desku na komunikaci mezi obvodem *LTC* a mikrokontrolérem. Byla vyvinuta jednotka s názvem *BMS\_A\_COM*. Jednotka obsahuje integrovaný obvod *LTC3300* a jeho součástky pro funkčnost obvodu. Dále deska obsahuje několik konektorů, aby se dal obvod různě nastavovat pro testování. Lze tak vyzkoušet například různé druhy transformátorů. Další chyba vznikla na komunikaci *SPI*, která propojuje mikrokontrolér *STM32*, *ISL94212* a *LTC3300*. Obvody ať už *ISL* nebo *LTC* fungují jednotlivě bez problému. Problém nastává, když se připojí oba obvody paralelně na jednu sběrnici. Obvod *ISL* má definovanou úroveň na pinu *MISO* nízkou, naproti tomu obvod *LTC* má definovanou úroveň vysokou pomocí *pull-up* rezistoru o hodnotě  $R = 2k\Omega$ . Mikrokontrolér pak čte z obvodu *ISL* maximální veličiny, například napětí na akumulátorech přečte místo  $U = 3V3$  jako  $U = 5V$ . Integrovaný obvod *ISL* nedokázal na pinu *MISO* dát nízkou úroveň. Proto bylo nutné obvod *LTC* přepínat na jinou komunikaci *SPI*, aby byly obvody navzájem odděleny.

Pro návrh pasivního balancování byla navržena deska s názvem *BMS\_P*, která byla otestovaná celá. Chyby, které se objevily během ožívání, byly všechny odstraněny. Jednalo se převážně o chyby vlivem pájení. Dále zde byly chyby způsobené špatným osazením součástek, popřípadě bylo použito špatné pouzdro součástky. Poslední problém nastal s komunikací *SPI*, jak bylo popsáno výše v textu. Tato chyba byla odstraněna předrátováním mikrokontroléru.

Poslední vyvinutá deska byla jednotka s názvem *DOK*. Jednotka opět měla chyby způsobené pájením. Dále zde byla chyba při návrhu komunikace *USB*. Izolovaný převodník typu *ADUM3160* měl prohozené piny. Jednotlivé obvody byly opraveny a jednotka *DOK* je plně funkční.



Obr. 4.1 Návrh systému pro řízení akumulátorů - pohled ze shora



Obr. 4.2 Návrh systému pro řízení akumulátorů - pohled ze strany

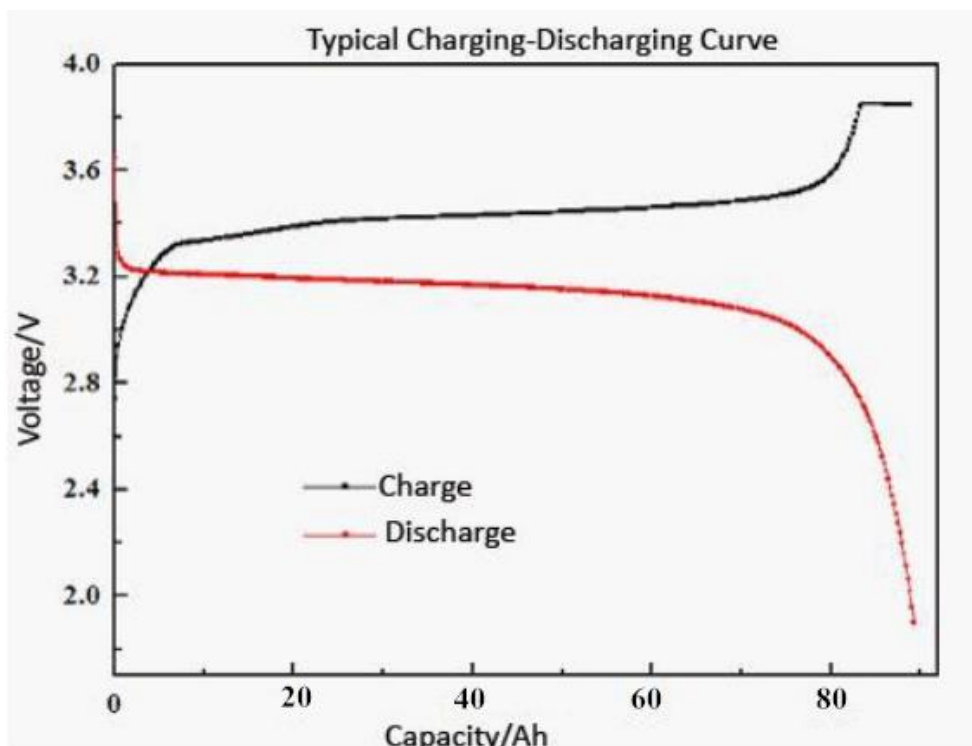
## 4.2 Vylepšení návrhu

Návrh lze samozřejmě vylepšovat a pro další revizi návrhu by bylo možné přidat různé funkce. Měření teploty a externího proudu by se dalo lépe řešit pomocí izolovaného převodníku. Z toho důvodu, že na *NTC* termistory je přivedena analogová zem a analogové napájení. Na analogovém napájení takto řešené se může objevit šum, vlivem vyvedení ven z desky. To negativně ovlivňuje měření celého systému. Při použití izolovaného systému by k tomu nedocházelo. Dalším důvodem galvanického oddělení je při poškození kabelu, kde by došlo ke zkratu analogového napájení. Dalším zlepšením systému by bylo použití komunikace *Wi-Fi* popřípadě konektoru na *Ethernet*. Toho lze teď docílit pomocí použití například jednotky *Raspberry PI* nebo *ESP32*, která bude s *BMS* spojena pomocí komunikace *USB*. Nová revize by mohla být opatřena konektorem, který bude mít izolovanou komunikaci *SPI* pomocí stejného izolátoru jako je použit na desce *BMS\_A* typ *MAX14851*, který zajistí přímou komunikaci s jednotkou například *ESP32*. Dalším vylepšením by bylo použití *DIP-switch* na *CAN* komunikaci, kdy by se pomocí spínačů navolilo *ID* identifikátor.

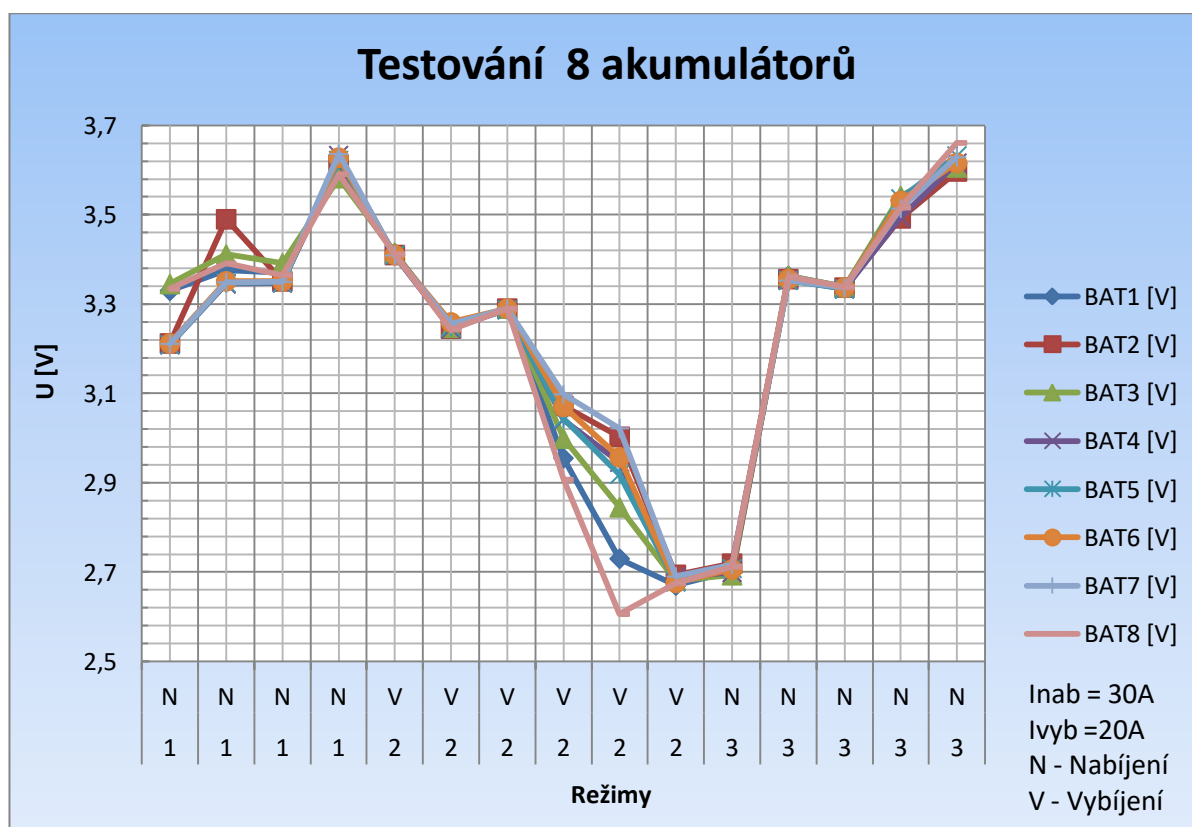
## 4.3 Testování balancérů

Testování celého systému je zobrazeno na Obr. 4.11, kde jsou propojeny všechny desky plošných spojů. Testování pasivního balancéru probíhalo na 8 akumulátorech, které se cyklicky nabíjely a vybíjely. Byly použity akumulátory o kapacitě  $C = 100 \text{ Ah}$ . Použito bylo 8 akumulátorů místo 12 z toho důvodu, že více akumulátorů nebylo k dispozici. Při použití více akumulátorů by se nemělo nic změnit na balancování jednotlivých článků. Proto nezáleží na počtu použitých akumulátorů. Nabíjecí proud akumulátorů byl  $I_{NAB} = 30 \text{ A}$  a vybíjecí proud byl  $I_{VYB} = 20 \text{ A}$ . Na grafech (Obr. 4.4, Obr. 4.5 a Obr. 4.6) je vidět cyklicky se opakující nabíjení a vybíjení. Balancování bylo použito pouze pasivní. Aktivní vyvažování nebylo ještě v tu dobu naprogramované. Při použití aktivního balancéru by se celý děj měl výrazně zlepšit. Balancovalo by se po celou dobu nabíjení i vybíjení, to by zapříčinilo naprosté srovnání akumulátorů. Výkonové balancovací rezistory použité na pasivní balancování měly hodnotu  $R_{BAL} = 680 \text{ m}\Omega$ . Tedy balancovací proud měl hodnotu okolo  $I_{BAL} = 5 \text{ A}$ , což je 5 % z jmenovité kapacity akumulátoru. Cykly nabíjení byly, pro jejich přehlednost, rozděleny do tří grafů (Obr. 4.4, Obr. 4.5 a Obr. 4.6). Na grafech je patrné, že se články v jejich maximech od sebe více rozjíždí. Je to způsobené tím, že okolo rozsahu  $U = 3.6 \text{ V}$  je těžké udržet akumulátory pospolu. Je to dané jejich nabíjecími a vybíjecími charakteristikami, které jsou uvedené na Obr. 4.3. V charakteristice jsou vidět kolena, která jsou strmá. V těchto oblastech je velmi

obtížné udržet články pohromadě. Algoritmus na pasivní balancování by bylo vhodné zlepšit a zpřesnit. Pak by celý systém *BMS* byl efektivnější.

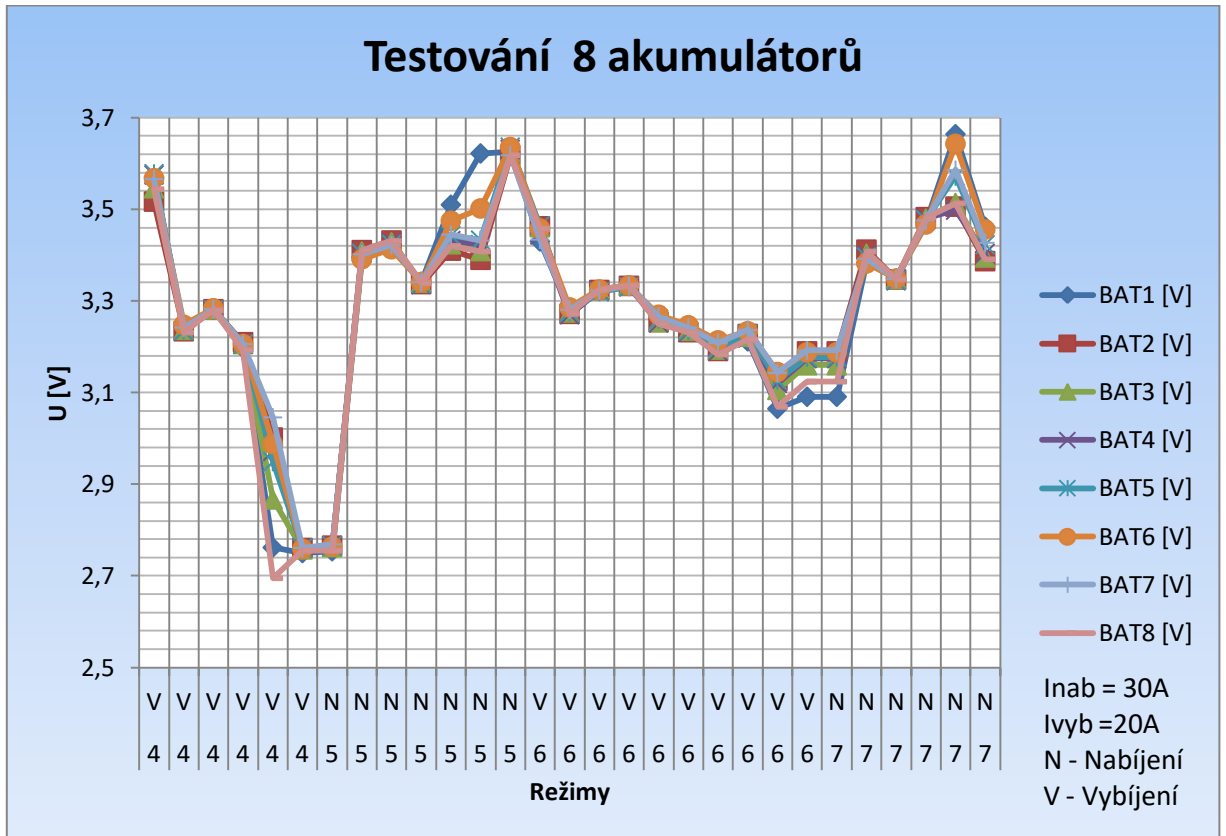


Obr. 4.3 Nabíjení a vybití akumulátorů typu LiFePo4 [převzato 36]

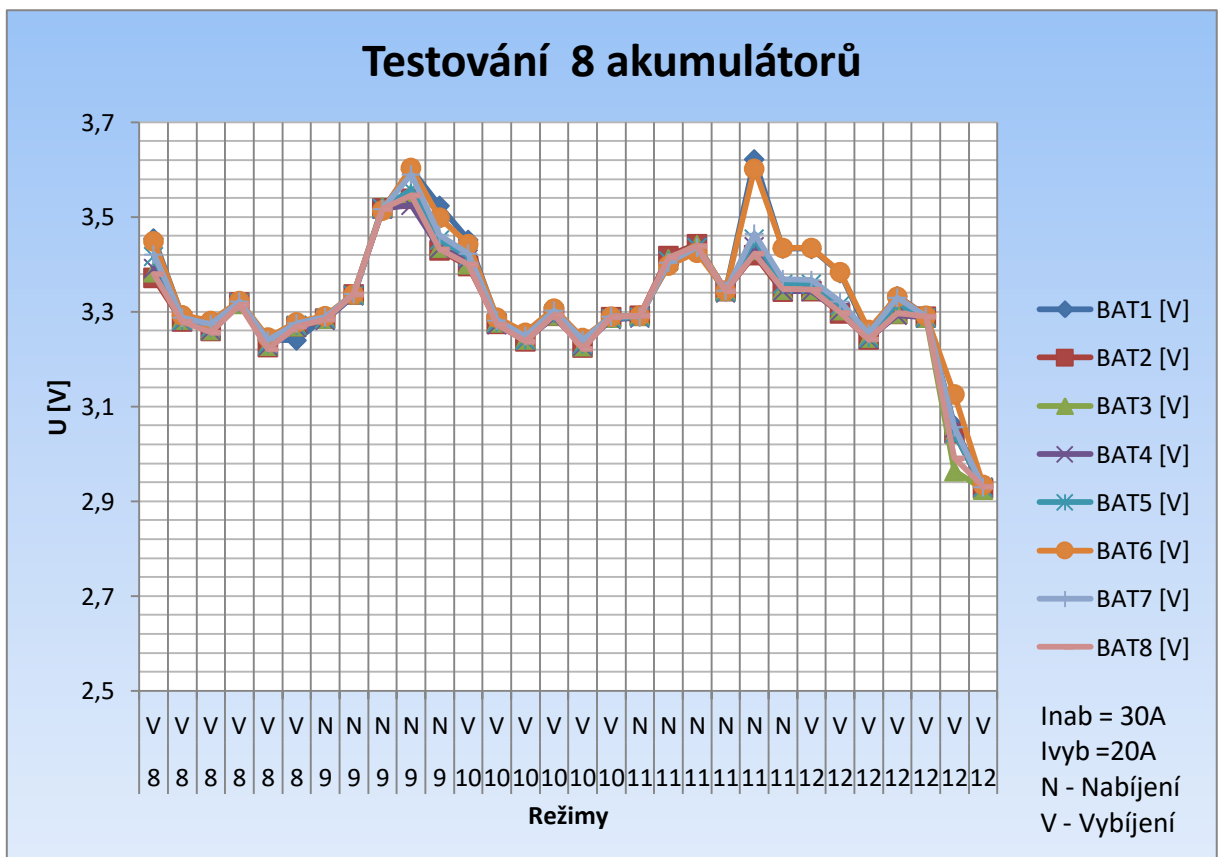


Obr. 4.4 Cyklicky se nabíjejících 8 akumulátorů - 1.fáze



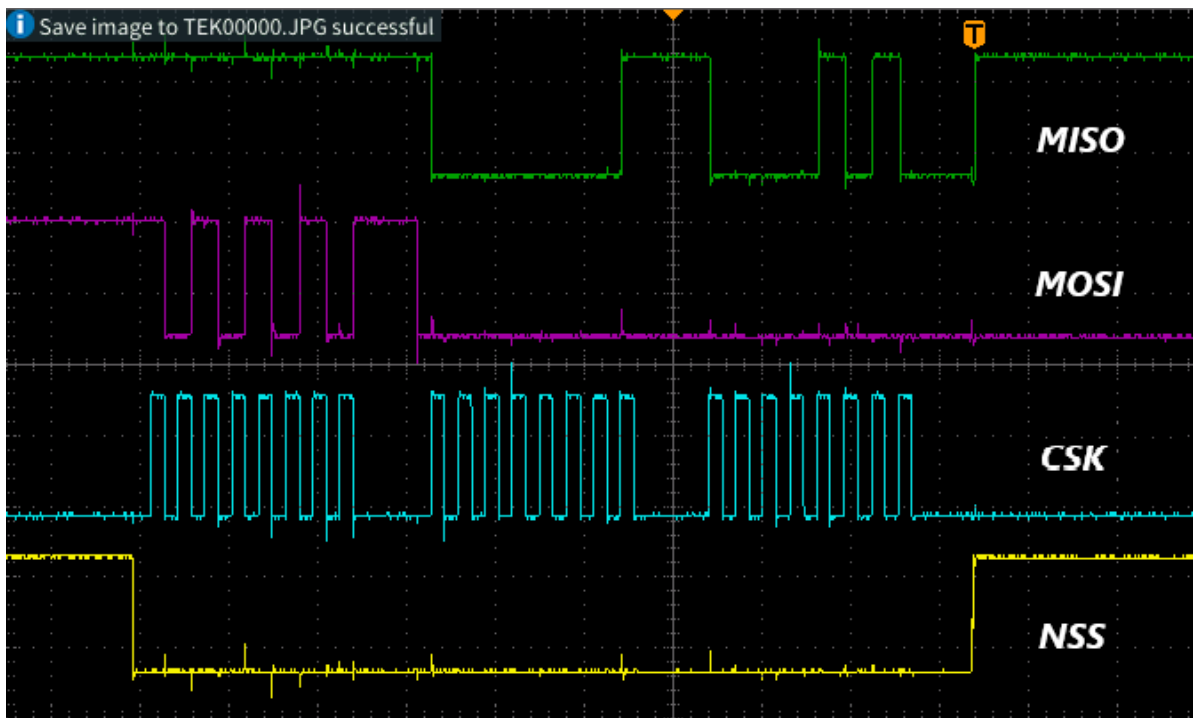


Obr. 4.5 Cyklicky se nabíjejících 8 akumulátorů - 2.fáze

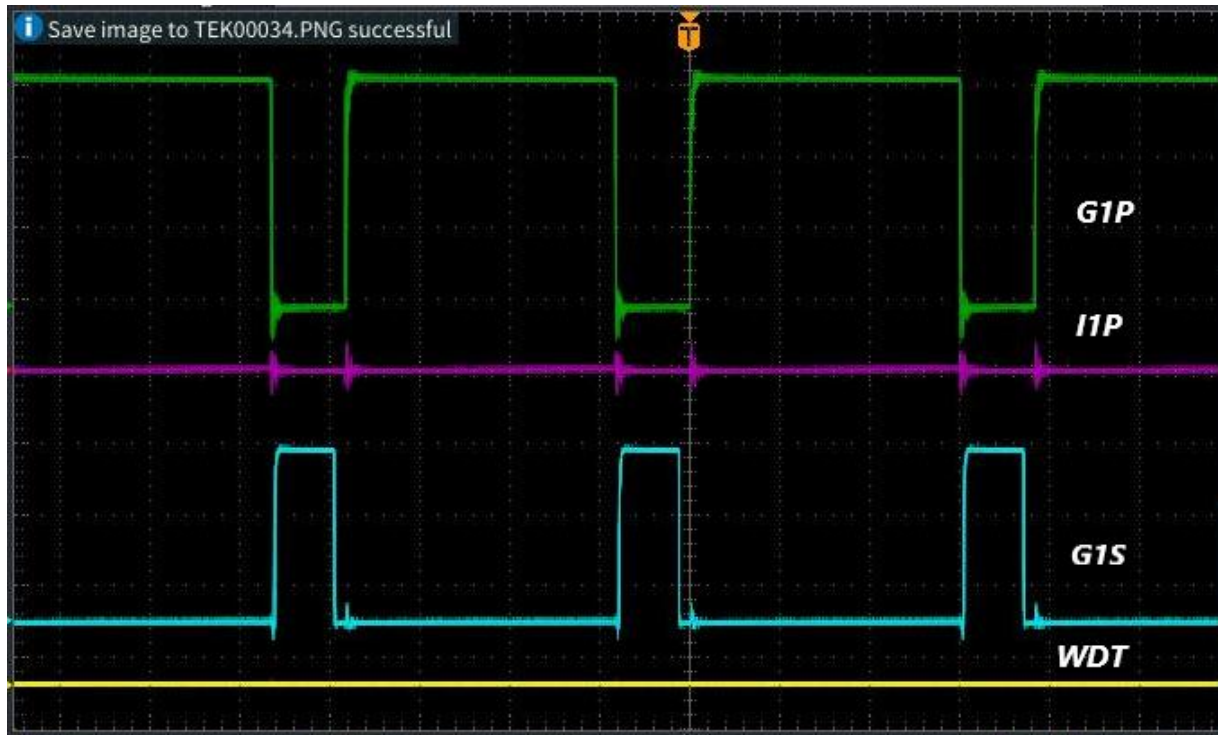


Obr. 4.6 Cyklicky se nabíjejících 8 akumulátorů - 3.fáze

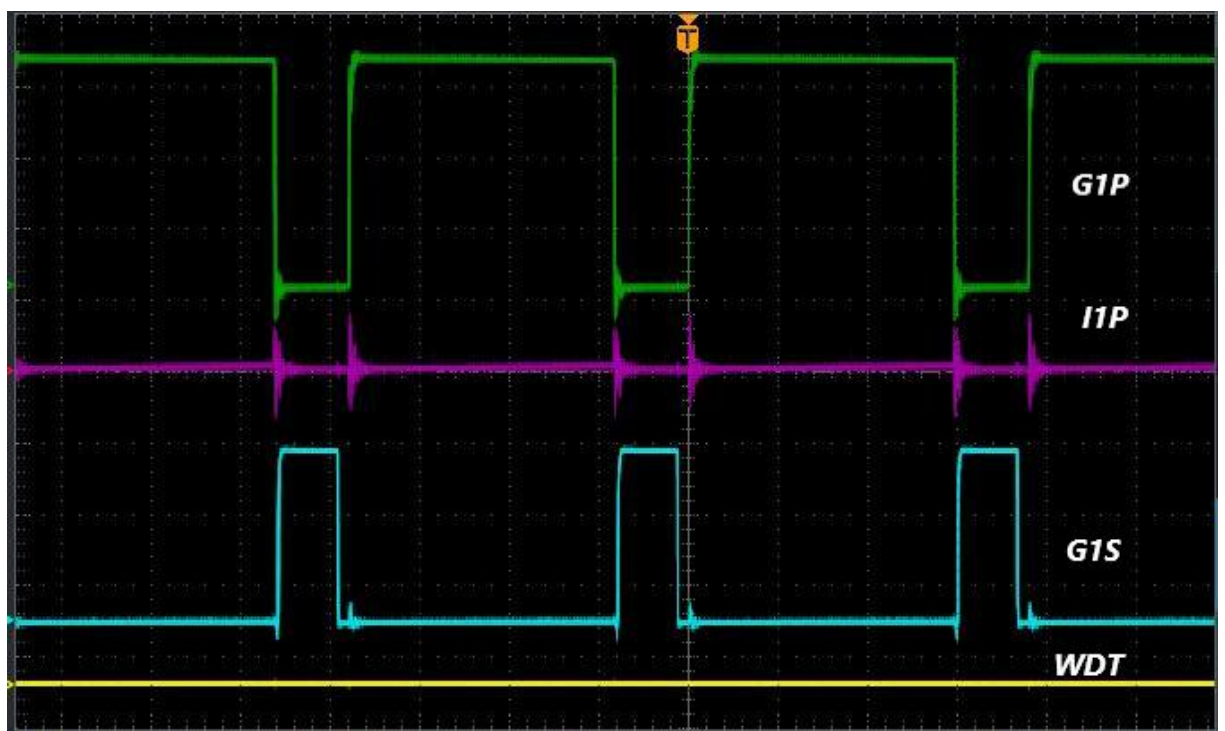
Testování aktivního balancování probíhalo na 6 akumulátorech. Důvod byl nesprávné zapojení druhého obvodu *LTC* pro spodních 6 akumulátorů. Obvod *LTC* a jeho výkonové části mají při nečinnosti obvodu odběr  $I = 5 \text{ mA}$ . To znamená, při použití dvou *LTC* obvodů (pro vyvažování 12 akumulátorů) je odběr  $I = 10 \text{ mA}$ . Tento odběr je způsoben velkým množstvím výkonových součástek. To je velice nepříznivé ve skladovém režimu. Proto by bylo vhodné celou desku *BMS\_A* odpínat pomocí tranzistorů, které budou řízeny optočleny. Obvod *LTC* má k dispozici čtyři režimy jak akumulátory vyvažovat. První režim je nečinnost, kdy obvod nedělá nic. Druhý režim je asynchronní vybíjení (Obr. 4.8) proudem o hodnotě  $I = 1,9 \text{ A}$ . Třetí režim je synchronní vybíjení (Obr. 4.9) proudem o hodnotě  $I = 2,2 \text{ A}$ . A poslední čtvrtý režim je nabíjení (Obr. 4.10) proudem o hodnotě  $I = 2 \text{ A}$ . Proud, jak nabíjecí tak, vybíjecí jsou závislé na rezistorech, na kterých obvod *LTC* měří. Měří se na primární a sekundární straně transformátoru. Na Obr. 4.7 je záznam komunikace *SPI* mezi mikrokontrolérem a obvodem *LTC*. Na pinu *GIP* jsou pulzy pro spínání tranzistoru primární strany transformátoru. Na pinu *IIP* je měření přes „šantový“ rezistor na primární straně transformátoru. Na pinu *GIS* jsou pulzy pro spínání tranzistoru sekundární strany transformátoru. Pin označený jako *WDT* je pro ověření správnosti příkazů. Pro nízkou úroveň napětí se provádí požadované příkazy a pro vysokou úroveň napětí se neprovedou žádné příkazy.



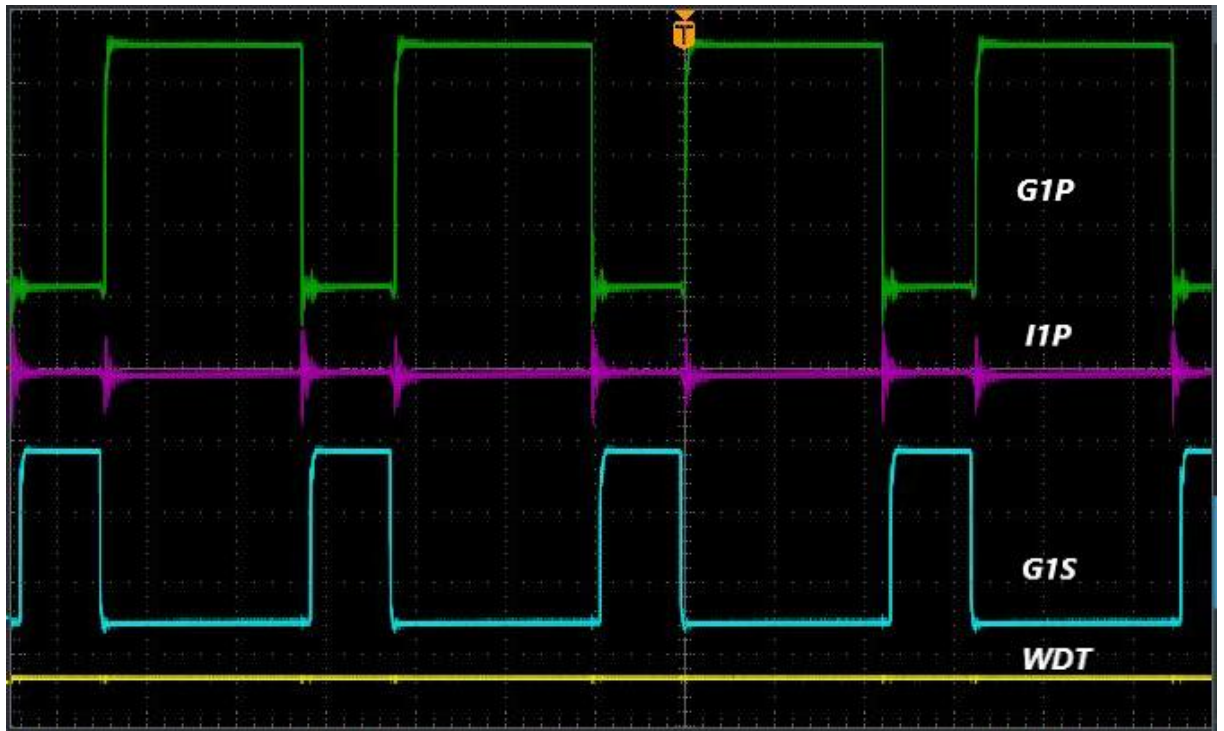
Obr. 4.7 Komunikace *SPI* mezi mikrokontrolérem *STM32* a *LTC* obvodem



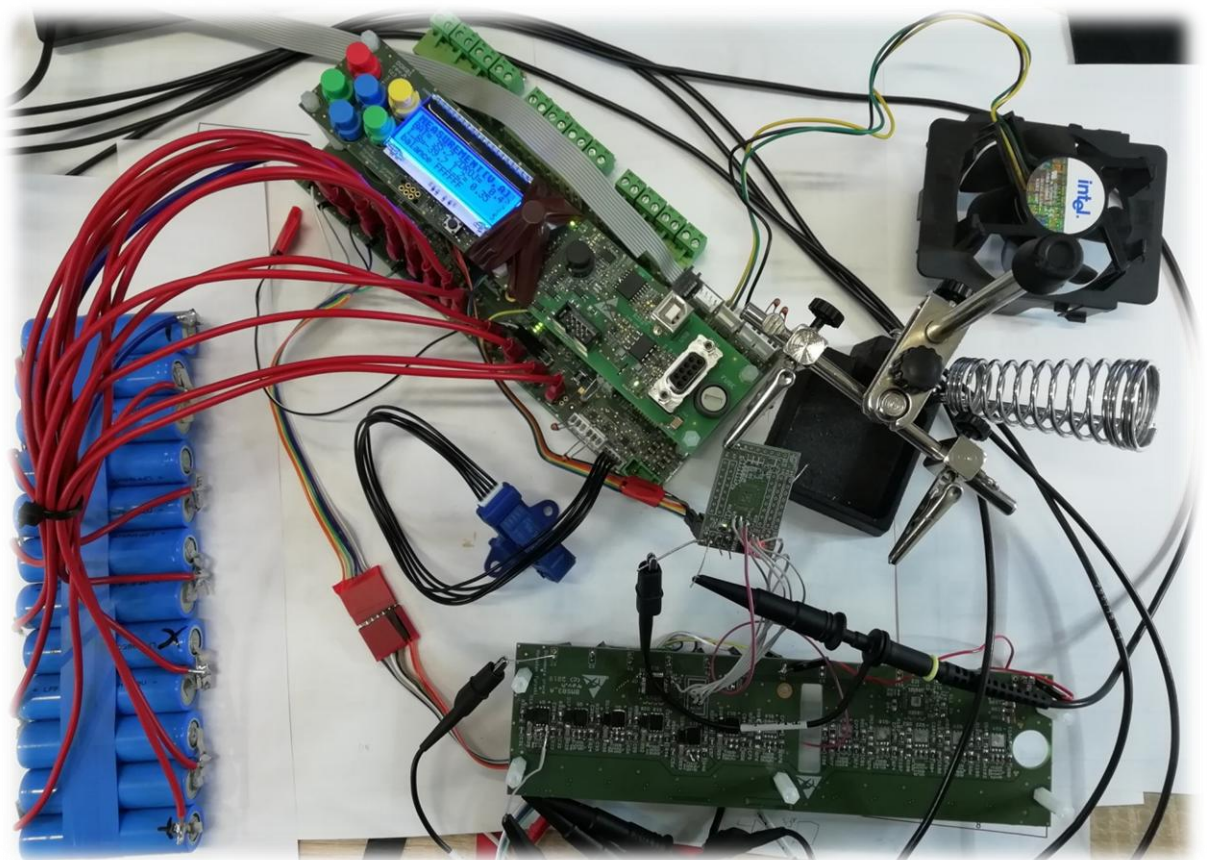
Obr. 4.8 Asynchronní vybíjení článku číslo 1



Obr. 4.9 Synchronní vybíjení článku číslo 1



Obr. 4.10 Nabíjení článku číslo 1



Obr. 4.11 Testování celého systému BMS

## Závěr

Hlavním cílem diplomové práce bylo navrhnout a zrealizovat systém pro řízení akumulátorů, zkráceně *BMS*. Systém byl navržen pro bateriové úložiště na 6 až 12 akumulátorů. Návrh je zaměřený na akumulátory v rozsahu kapacit od jednotek [Ah] až po desítky nebo stovky [Ah]. Dále je návrh koncipován na oba typy balancérů, jak aktivní tak i pasivní. Pasivní balancéry jsou omezeny na balancovací proud  $I = 10\text{ A}$  a aktivní balancéry jsou omezeny na balancovací proud  $I = 5\text{ A}$ . Návrh se dá proto použít v mnoha různých aplikacích.

Práce je rozdělena na čtyři hlavní části. Nejprve mapuje akumulátory, které by se daly použít pro aplikaci bateriového úložiště. Na základě toho byla vyhotovena tabulka shrnující vlastnosti jednotlivých akumulátorů. V závislosti na tabulce byly vybrány akumulátory typu *LiFePO<sub>4</sub>* na bázi lithia. Dále byl proveden průzkum možných vyvažovacích systémů pro akumulátory, kde se hodnotily klady a zápory jednotlivých systémů. Po důkladném prozkoumání byly nakonec zvoleny oba typy vyvažování, jak aktivní tak i pasivní. Důvod použití obou balancérů byl kvůli větší možnosti říditelnosti vyvažování akumulátorů. Dále se v diplomové práci přešlo k realizaci návrhu. Návrh systému se skládá ze tří částí. První část s názvem *BMS\_P* je zaměřena na měření napětí, proudů a teplot. Řízení systému má na starost mikrokontrolér *STM32F446*, který komunikuje se všemi částmi systému. Na desce plošného spoje je dále umístěn integrovaný obvod *ISL94212*, který pasivně vyvažuje jednotlivé články. Druhá část s názvem *BMS\_A* je zaměřena na aktivní vyvažování. O aktivní vyvažování se stará obvod *LTC3300*, který umí oba směry toku energie. To znamená nabíjení popřípadě vybíjení akumulátorů. Třetí část s názvem *DOK* je zaměřena na komunikaci s nadřazeným systémem, ovládání systému pomocí tlačítek a zobrazování veličin na displeji. V další části práce byly popsány možné režimy provozu systému *BMS*. Byly popsány jenom určité režimy, ve kterých by měl být systém nejvíce provozován. Režimy jsou: skladový režim, testovací režim a běžný provoz.

V poslední části diplomové práce byl systém *BMS* testován. Testování bylo rozděleno podle desek plošných spojů na tři části, které se nejdříve testovaly odděleně a postupně byly všechny *DPS* spojeny do systému. V první části se otestovala všechna obvodová schémata na *DPS* s názvem *BMS\_P*. Poté se otestovala *DPS* s názvem *DOK*. Obě *DPS* se spojily a otestovala se komunikace, zobrazování veličin a pasivní vyvažování. Pasivní vyvažování akumulátorů je uvedeno v grafech v kapitole *Testování balancérů*. Obě *DPS* obsahovaly chyby, kte-

ré v průběhu testování byly odstraněny. Poslední *DPS* s názvem *BMS\_A*, která je určena pro aktivní vyvažování, měla nejvíce chyb v návrhu. Byla ale nakonec otestovaná celá a grafy byly opět zaneseny v kapitole *Testování balancérů*. Návrh *BMS\_A* se musel částečně udělat znovu s *DPS* s názvem *BMS\_A\_COM*. V návrhu byla chyba v komunikaci *SPI*, která byla novým návrhem otestovaná a opravená.

Nebylo však otestováno spojení pasivního a aktivního vyvažování jednoho článku. Bohužel z důvodu absence algoritmu na řízení balancérů nebylo možné balancéry otestovat společně. Je potřeba vyřešit autonomii balancování. To znamená, za jakých podmínek se bude vyvažovat aktivně, za jakých podmínek pasivně a za jakých podmínek budou vyvažovat oba zároveň. Návrh *BMS*, jak již bylo řečeno, mělo několik chyb, které byly odstraněny. Proto je tedy nutné udělat novou revizi *HW*, aby se opravené chyby zanesly do schématu.

Návrh pro řízení vyvažování lze řešit i jiným způsobem. Lze to provést jiným typem integrovaného obvodu, než je použit v tomto návrhu, například od firmy Texas instruments, STMicroelectronics, ON Semiconductor a spousta dalších výrobců. Je velký výběr integrovaných obvodů pro řízení balancování, proto je obtížné si vybrat ten správný. Výběr závisí hlavně na konkrétním návrhu. Ten nám určuje počet připojených akumulátorů, komunikaci, cenu atd... V našem konkrétním návrhu hrál hlavní roli počet připojených akumulátorů a komunikace.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Elektronické napájecí zdroje a akumulátory / Jiří Hammerbauer. -- 2. vyd. -- Plzeň : ZČU, 1998. -- 181 s. : 187 obr., tab., lit.. -- ISBN 80-7082-411-5 [000026463]
- [2] [online]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/16090-jak-funguje-oloveny-akumulator>
- [3] Novinky - Klasické olovené baterie a technologie AGM - Pneu kvalitně.cz. Levné pneumatiky v Brně - Pneu kvalitně.cz [online]. Copyright ©2012 [cit. 08.04.2019]. Dostupné z: <https://www.pneu-kvalitne.cz/novinky/klasicke-olovene-autobaterie-varta-technologie-agm>
- [4] Články, baterie a akumulátory | Abeceda baterií a akumulátorů | Abeceda baterií a akumulátorů. Články, baterie a akumulátory | Abeceda baterií a akumulátorů | Abeceda baterií a akumulátorů [online]. Copyright © 2009 [cit. 08.04.2019]. Dostupné z: <http://www.battex.info>
- [5] NiMH battery dissection. | Download Scientific Diagram. ResearchGate | Share and discover research [online]. Copyright © ResearchGate [cit. 08.04.2019]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/NiMH-battery-dissection\\_fig1\\_286969372](https://www.researchgate.net/figure/NiMH-battery-dissection_fig1_286969372)
- [6] Lithiové akumulátory velkých výkonů a jejich použití - Časopis Elektro - Odborné časopisy. Odborné časopisy [online]. Copyright © 2014 [cit. 08.04.2019]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/lithiove-akumulatory-velkych-vykonu-a-jejich-pouziti--13384>
- [7] [online]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>
- [8] Li-ion baterie: principy, provoz, rady (1.část) - Cnews.cz. Cnews.cz | Od tranzistorů až po PC sestavy [online]. Dostupné z: <https://www.cnews.cz/li-ion-baterie-principy-provoz-rady-1-cast/>
- [9] Support - LiPol Battery Co.Ltd. LiPoly Battery Great Manufacturer from China [online]. Dostupné z: <https://www.lipoly-battery.com/support/>
- [10] [online]. Dostupné z: <https://cz.linkedin.com/company/lifepo4-battery-limited>
- [11] Techmagazín.cz. Techmagazín.cz [online]. Copyright © 2010 [cit. 08.04.2019]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/46254>
- [12] Revoluční bezpečné baterie HE3DA se budou vyrábět u Havířova | Svět hardware. Svět hardware | homepage [online]. Copyright © 1998 [cit. 08.04.2019]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/revolucni-bezpecne-baterie-he3da-se-budou-vyrabet-u-havirova/45297>
- [13] Battery Management System - an overview | ScienceDirect Topics. ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books. [online]. Copyright © [cit. 08.04.2019]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/battery-management-system>
- [14] (PDF) Battery Management System Hardware Concepts: An Overview. ResearchGate | Share and discover research [online]. Copyright © ResearchGate 2019. All rights reserved. [cit. 08.04.2019]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/324117444\\_Battery\\_Management\\_System\\_Hardware\\_Concepts\\_An\\_Overview](https://www.researchgate.net/publication/324117444_Battery_Management_System_Hardware_Concepts_An_Overview)
- [15] [online]. Dostupné z: <https://www.pdfsemanticscholar.org/0c70/9b4b316d682e6503de5d342d84ef69738c15.pdf>
- [16] Protection and Management of Marine Lithium Battery Banks || Nordkyn Design. Nordkyn Design - Marine Design and Engineering [online]. Copyright © 2013 [cit. 08.04.2019]. Dostupné z: <http://nordkyndesign.com/protection-and-management->

- of-marine-lithium-battery-banks/
- [17] MDPI - Publisher of Open Access Journals [online]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/6/4/2149/pdf>
- [18] Energies | Free Full-Text | Single Switched Capacitor Battery Balancing System Enhancements | HTML. MDPI - Publisher of Open Access Journals [online]. Copyright © 2013 by the authors [cit. 08.04.2019]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/6/4/2149/htm>
- [19] BMS. Home [online]. Copyright © avdweb 2019 [cit. 08.04.2019]. Dostupné z: <https://www.avdweb.nl/solar-bike/electronics/bms>
- [20] [online]. Dostupné z: <https://www.renesas.com/cn/zh/www/doc/datasheet/is194212.pdf>
- [21] [online]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm46002.pdf>
- [22] [online]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm53601-q1.pdf>
- [23] [online]. Copyright © [cit. 08.04.2019]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/389/stm32f446mc-956216.pdf>
- [24] [online]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/389/m95m02-dr-955172.pdf>
- [25] Lithium Battery Protection Circuit - Why are there two MOSFETs in series, reversed? - Electrical Engineering Stack Exchange. Electrical Engineering Stack Exchange [online]. Dostupné z: <https://electronics.stackexchange.com/questions/277248/lithium-battery-protection-circuit-why-are-there-two-mosfets-in-series-revers>
- [26] Reading DC fan RPM with Arduino. theoryCIRCUIT - Do It Yourself Electronics Projects - Find every electronics circuit diagram here, Categorized Electronic Circuits and Electronic Projects with well explained operation and how to make it procedure and then New Circuits every day, Enjoy and Discover electronics. [online]. Copyright ©2013 [cit. 08.04.2019]. Dostupné z: <http://www.theorycircuit.com/reading-dc-fan-rpm-arduino/>
- [27] [online]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tp15110.pdf>
- [28] [online]. Copyright © [cit. 08.04.2019]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/33001fb.pdf>
- [29] Redirecting to /Document/b58e412622a07b4d6373cfd07a9c4cde/SPX1117M3-L-3-3.pdf. Redirecting to /cz/ [online]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/Document/b58e412622a07b4d6373cfd07a9c4cde/SPX1117M3-L-3-3.pdf>
- [30] [online]. Copyright ©D [cit. 08.04.2019]. Dostupné z: [https://cz.mouser.com/datasheet/2/281/kdc\\_cre1-951969.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/281/kdc_cre1-951969.pdf)
- [31] Redirecting to /Document/9b812e3f8e6ee12f91f111713fef0e13/EA%20DOGM132B-5.pdf. Redirecting to /cz/ [online]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/Document/9b812e3f8e6ee12f91f111713fef0e13/EA%20DOGM132B-5.pdf>
- [32] [online]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso1050.pdf>
- [33] [online]. Dostupné z: [https://cz.mouser.com/datasheet/2/163/DS\\_FT230X-5395.pdf](https://cz.mouser.com/datasheet/2/163/DS_FT230X-5395.pdf)
- [34] [online]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/609/ADuM3160-1503629.pdf>
- [35] [online]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/286/ps2801-18281.pdf>
- [36] LiFePO4 Battery Prismatic Cell 3.2V 80ah with Aluminum Case for Battery Pack - China LiFePO4 Battery, Lithium Battery Pack | Made-in-China.com. Made-in-China.com - Manufacturers, Suppliers & Products in China [online]. Copyright © 2019 Focus Technology Co., Ltd. All Rights Reserved. [cit. 08.04.2019]. Dostupné z: <https://m.made-in-china.com/product/LiFePO4-Battery-Prismatic-Cell-3-2V-80ah-with-Aluminum-Case-for-Battery-Pack-724198882.html>



## **Seznam příloh**

Přílohy jsou vloženy na CD, které je připojeno k diplomové práci. Obsahem příloh jsou schémata jednotlivých desek plošných spojů, jejich layouty, obrázky z testování návrhu, obrázky z osciloskopu, grafy a obrázky k diplomové práci.

