

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Aktivní balancování a správa akumulátorů v domácí
bateriové stanici**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan JANDÍK**
Osobní číslo: **E18N0006K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Aktivní balancování a správa akumulátorů v domácí bateriové stanici**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování

Navrhněte, realizujte a otestujte zařízení pro aktivní balancování a správu akumulátorů v domácí bateriové stanici.

1. Na základě rešerše uveďte funkce a parametry používaných systémů pro řízení akumulátorů (BMS).
2. Porovnejte dostupná řešení aktivních BMS a vyberte vhodnou variantu s ohledem na použití v domácí bateriové stanici.
3. Zkonstruuje funkční vzorek a navrhněte rozhraní pro komunikaci s nadřazeným systémem.
4. Na realizovaném zařízení proveďte měření a zhodnoťte výsledky.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. ČENĚK, Miroslav, Akumulátory od principu k praxi. Praha: BEN, 2003. ISBN 80-86534-03-0.
2. Online zdroje ? tutoriály, aplikační poznámky a katalogové listy výrobců součástek.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Zich**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



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



L.S.



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

Abstrakt

Překládaná diplomová práce se zaměřuje na problematiku správy akumulátorů použitých v domácí bateriové stanici. Konkrétní obvodové a softwarové řešení zařízení bylo vybráno na základě provedené rešerše a se znalostí požadovaných parametrů a funkcí dané bateriové stanice. Po rešerši dostupných řešení správy a balancování akumulátorů byly provedeny nezbytné výpočty a ideový návrh vlastního zařízení. Obvody pro balancování a monitorování akumulátorů byly doplněny o blok řízení a rozhraní zabezpečující komunikaci s dalšími komponentami bateriové stanice. Zařízení bylo realizováno též s ohledem na vhodnou mechanickou konstrukci vzhledem ke stávajícím rozměrům modulární akumulátorové sestavy. Součástí funkčního vzorku je též firmware bloku řízení umožňující otestování dosažených parametrů a požadovaných funkcí. Výsledné zařízení umožňuje flexibilní implementaci algoritmů pro aktivní balancování a monitorování modulární akumulátorové sestavy v domácí bateriové stanici

Klíčová slova

Aktivní balancování, akumulátor, BMS, baterie, bateriové uložení, bateriový management.

Abstract

The master thesis is focused on the issue of the battery management systems used in the home battery stations. The individual circuits and software approach of the device were selected according to the performed research and with the knowledge of the required parameters and functions of the battery station. After the research in the field of the available solutions for the battery management and balancing the necessary calculations were followed by the design of the device. The circuitry used for balancing and monitoring of the accumulators are supported by the control block and communication interface which is important for cooperation with the others systems components. The device itself is realized with respect to the mechanical design of the current dimensions of the modular accumulator pack. The functional sample includes also the firmware of the control block enabling the test of the device parameters and required functions. The final version of the device allows the implementation of the flexible algorithms for active balancing and monitoring of the modular accumulator pack in the home battery station.

Key words

Active balancing, accumulator, BMS, battery, battery management, battery storage.

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.

V Plzni dne 17.6.2020

.....

Bc. Jan Jandík

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jan Zichovi za praktické připomínky, cenné rady a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
SEZNAM OBRÁZKŮ	12
SEZNAM TABULEK	13
ÚVOD	14
1 DOMÁCÍ BATERIOVÉ STANICE	15
1.1 PŘEHLED BATERIOVÝCH STANIC.....	15
1.2 ARCHITEKTURA BATERIOVÉ ÚLOŽIŠTĚ	17
1.3 PŘÍKLADY BATERIOVÝCH ÚLOŽIŠŤ DOSTUPNÝCH NA TRHU	18
1.3.1 <i>Alpha ESS SMILE5</i>	19
1.3.2 <i>Hansol AIO 7.2</i>	19
1.3.3 <i>SOLTARO</i>	20
1.3.4 <i>EnergyCloud HOME</i>	20
2 SYSTÉMY PRO ŘÍZENÍ AKUMULÁTORŮ	21
2.1 DRUHY AKUMULÁTORŮ PRO BATERIOVÉ ULOŽIŠTĚ	21
2.1.1 <i>Olověné akumulátory</i>	21
2.1.2 <i>NiCd akumulátory</i>	21
2.1.3 <i>NiMH akumulátory</i>	21
2.1.4 <i>Lithiové akumulátory</i>	21
2.2 DRUHY NEVYVÁŽENOSTI AKUMULÁTORŮ	22
2.3 VYVAŽOVÁNÍ ČLÁNKŮ	24
2.3.1 <i>Pasivní BMS</i>	24
2.3.2 <i>Aktivní BMS</i>	26
3 ALGORITMY PRO VYVAŽOVÁNÍ AKUMULÁTOROVÝCH SESTAV	35
3.1 ROZDĚLENÍ DLE VÝKONU	35
3.2 ROZDĚLENÍ PODLE STAVU NEVYVÁŽENOSTI	35
4 NÁVRH BMS	37
4.1 AKUMULÁTOROVÁ SESTAVA	37
4.2 ANALÝZA SPOTŘEBY ENERGIE	38
4.3 POŽADOVANÉ PARAMETRY A FUNKCE	39
4.4 ARCHITEKTURA ZAŘÍZENÍ.....	39
5 PRAKTICKÁ REALIZACE	44
5.1 VÝKONOVÁ DESKA	44
5.2 ŘÍDICÍ DESKA.....	48
6 FIRMWARE	49
7 MĚŘENÍ A TESTOVÁNÍ FUNKCÍ	51
ZÁVĚR	53
POUŽITÁ LITERATURA	54
PŘÍLOHY	1

PŘÍLOHA A – SCHÉMA VÝKONOVÉ DESKY – HIERARCHICKÁ STRUKTURA.....	1
PŘÍLOHA B – SCHÉMA VÝKONOVÉ DESKY – MONITOROVACÍ OBVOD.....	2
PŘÍLOHA C – SCHÉMA VÝKONOVÉ DESKY – SPODNÍ BALANCÉR	3
PŘÍLOHA D – SCHÉMA VÝKONOVÉ DESKY – HORNÍ BALANCÉR	4
PŘÍLOHA E – SCHÉMA ŘÍDICÍ DESKY – HIERARCHICKÁ STRUKTURA	5
PŘÍLOHA F – SCHÉMA ŘÍDICÍ DESKY – NAPÁJENÍ	6
PŘÍLOHA G – SCHÉMA ŘÍDICÍ DESKY – MCU.....	7
PŘÍLOHA H – SCHÉMA ŘÍDICÍ DESKY – KOMUNIKAČNÍ ROZHRANÍ	8

Seznam symbolů a zkratk

Symboly

DoD_{\max} [%]	Maximální povolená hloubka vybití akumulátoru
E_{modul} [kWh]	Energie akumulátorové sestavy
I_{bal} [A]	Elektrický proud pro balancování článku
$n_{\text{článek}}$ [-]	Počet článků sestavy
P_{\max} [W]	Maximální výstupní výkon bateriové stanice
Q_{jmen} [C]	Jmenovitá kapacita článku (náboj)
t_{vyb} [s]	Čas vybíjení akumulátorové sestavy
U_{jmen} [V]	Jmenovité napětí článku
$\Delta Q_{2\%}$ [C]	2% odchylka kapacity článku

Zkratky

A/D	Analogově/digitální
BMS	Battery management system (systém pro řízení akumulátorů)
CAN	Controller Area Network
CRC	Cyclic Redundancy Check (cyklický redundantní součet)
DC	Direct current (stejnsměrný proud)
DoD	Depth of discharge (hloubka vybití)
DPS	Deska Plošných Spojů
HDO	Hromadné dálkové ovládání
HMI	Humane-machine interface (rozhraní člověk-stroj)
IO	Integrovaný obvod
LDO	Low-dropout regulator (regulátor s nízkým úbytkem)
LED	Light Emitting Diode (dioda emitující světlo)
LiFePO ₄	Lithium-železo-fosfát
Li-Ion	Lithium-iont
Li-Pol	Lithium-polymer
MCU	Microcontroller (mikrokontroler)
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (tranzistor řízený polem s vrstvou kovového oxidu)
MPPT	Maximum power point tracker
NiCd	Nikl-kadmium
NiMH	Nikl-metal hydrid
NTC	Negative thermal coefficient (záporný teplotní součinitel)
OCV	Open-circuit voltage (napětí v otevřené smyčce)
OV	Overvoltage (přepětí)
SOC	State of charge (stav nabití)
SPI	Serial Peripheral Interface
SWD	Serial Wire Debug
TSD	Thermal shutdown
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter
UV	Undervoltage (podpětí)
Wi-Fi	Wireless fidelity

Seznam obrázků

Obr. 1 On-grid systém s přímým připojením bateriové stanice do sítě bez možnosti akumulace energie	16
Obr. 2 Off-grid systém bez připojení bateriové stanice do sítě a s možností akumulace energie	16
Obr. 3 Blokové schéma domácí bateriové stanice	17
Obr. 4 Bateriová stanice Alpha ESS SMILE5 [1]	19
Obr. 5 Bateriová stanice Hansol AIO 7.2 [2]	19
Obr. 6 Bateriová stanice SOLTARO [3]	20
Obr. 7 Bateriová stanice EnergyCloud HOME 38 [4]	20
Obr. 8 Ztráta kapacity LiFePO4 článků v závislosti na počtu cyklů pro různé stupně zátěže [9]	23
Obr. 9 Akumulátorová sestava se zařazeným novým článkem	23
Obr. 10 Princip pasivního BMS	25
Obr. 11 Pasivní BMS pro 12 článků – produkt společnosti EnergyCloud, a.s.	25
Obr. 12 Princip přenosu energie mezi sousedními články: a) vzestupné měniče, b) sestupné měniče, c) obousměrné měniče [8]	26
Obr. 13 Princip přenosu energie mezi články v sestavě s pomocí přepínače [8]	27
Obr. 14 Princip přenosu mezi jednotlivými články a celou sestavou: a) z článku do sestavy, b) ze sestavy do článku, c) obousměrný přenos mezi články a sestavou [8]	28
Obr. 15 Princip přenosu energie mezi články a sběrnici [8]	29
Obr. 16 Buck topologie	30
Obr. 17 Boost topologie	30
Obr. 18 Buck-Boost topologie	31
Obr. 19 Flyback topologie	31
Obr. 20 Aktivní BMS řešení společnosti Texas Instruments [16]	32
Obr. 21 Aktivní BMS řešení společnosti Analog Devices [20]	33
Obr. 22 Aktivní řešení BMS sestaven z diskretních prvků [8]	34
Obr. 23 7,6 kWh modul pro rozšíření úložiště domácí bateriové stanice řady EnergyCloud HOME [4]	38
Obr. 24 Obvody LTC3300-1 a LTC6803-1 použité pro aktivní BMS [20]	40
Obr. 25 Princip balancování akumulátorových sestav větších rozsahů s obvody LTC3300-1 [20]	41
Obr. 26 Architektura navrženého BMS	42
Obr. 27 Výkonová deska BMS	44
Obr. 28 Zapojení obvodu LTC3300-1 pro řízení balancování	46
Obr. 29 Obousměrný flyback měnič pro aktivní balancování	46
Obr. 30 Zapojení monitorovacího obvodu LTC6803-1	47
Obr. 31 Řídicí deska BMS	48
Obr. 32 Vývojový diagram firmware v řídicím MCU	49
Obr. 33 Průběh napětí jednotlivých článků v čase pro jeden modul (12 článků) bez zátěže	51
Obr. 34 Oscilogram zachycující nabíjení (vlevo) a vybití (vpravo) článku	52

Seznam tabulek

Tab. 1 Přehled parametrů LiFePO_4 článků ZG-LF020A [22].....37

Úvod

Trendem několika posledních let a vizí budoucnosti je ukládání a skladování elektrické energie z distribuovaných mikrozdrojů, přičemž samotné skladování elektrické energie je často podceňovanou záležitostí. Mnohdy se tak stává, že nadbytek generované energie (například vysoká slunečnost pro fotovoltaickou elektrárnu v kombinaci s nízkým odběrem objektu) je dodáván do distribuční soustavy, která může být takto přetěžována. Dalším aspektem tohoto přístupu je diskutabilní ekonomická rentabilita vzhledem k nízké výkupní ceně za kWh či alternativní řešení nakládání s touto nevyužitou energií v případě, že nejsou přetoky do sítě povoleny. Pro tyto případy je pak na místě otázka, zda je možné energii efektivně skladovat. Skladování elektrické energie v místech distribuovaných mikrozdrojů by s sebou přinesla řadu výhod. Zejména tedy možnost aktivního řízení její výroby a využití pro místní spotřebiče. Nedocházelo by tak k častým dodávkám energie do sítě a při správném hospodaření s akumulovanou energií by některé objekty mohly být dokonce energeticky soběstačné. Tato skutečnost by mohla vést k rozšíření aplikací využívajících obnovitelných zdrojů energie a také ke stabilizaci a odlehčení distribuční soustavy.

Jedním z obvyklých způsobů skladování elektrické energie je využití bateriových stanic, s jejichž efektivním používáním úzce souvisí i vhodná správa vlastních elektrochemických článků. Adekvátním zacházením s akumulátorem může být zvýšena účinnost celého systému a prodloužena doba, kdy tento systém dodává energii napájenému objektu. Důležitou skutečností související se správou akumulátorů je také životnost akumulátorové sestavy.

Před stanovením požadovaných parametrů zařízení bylo nezbytné zanalyzovat spotřebu typické domácnosti, u které se předpokládá instalace domácí bateriové stanice. Z této analýzy vyplynuly požadované parametry systému pro správu akumulátorů (především výkon balancérů). Následná rešerše integrovaných obvodů a jejich aplikací v oblasti balancování a monitorování článků posloužila k výběru vhodného základu systému pro řízení akumulátorů (BMS). Pro splnění požadovaných funkcí BMS bylo ke zmiňovaným obvodům nutno přidat také blok řízení v podobě mikrokontroleru a rozhraní pro komunikaci s dalšími systémovými částmi domácí bateriové stanice.

Mezi požadavky kladené na zařízení byla také implementace základního firmware umožňujícího ovládání balancování a monitorování jednotlivých článků. Společně s implementací těchto nezbytných funkcí došlo také k realizaci jednoduchého algoritmu použitého pro balancování akumulátorové sestavy. U realizovaného zařízení byly provedeny testy požadovaných parametrů a funkcí.

1 Domácí bateriové stanice

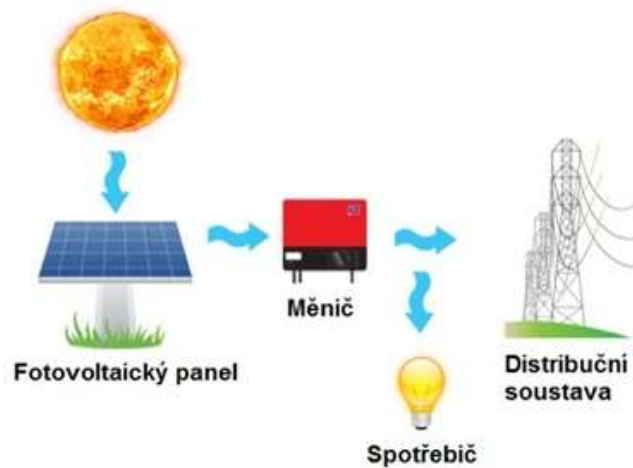
Jako domácí uložistiště elektrické energie jsou obvykle označovány takové akumulátory a akumulátorové stanice, jejichž kapacita se pohybuje s v řádech jednotek až desítek kWh. Využití těchto stanic je cílené zejména na vlastní spotřebu rodinných domů a efektivní hospodaření s energií vyrobenou vlastními obnovitelnými zdroji či případně s energií uloženou z elektrické sítě v době cenově výhodných tarifů. Správné užití takového zařízení přináší nejen energetickou (potažmo finanční) úsporu chodu domácnosti, ale také možnost rychlého přenosu velké části akumulované energie například do akumulátorů elektromobilu s využitím stejnosměrně vázané rychlonabíjecí stanice.

1.1 Přehled bateriových stanic

Na trhu se vyskytuje mnoho druhů bateriových akumulčních systémů počínaje malými zdroji zálohovacích zařízení a konče velkými energetickými stanicemi. Akumulátory s nízkým napětím a malou kapacitou se mnohdy obejdou i bez nadřazených systémů správy akumulátorů. S nárůstem napětí a kapacity náboje takového zdroje se však nadřazený systém pro správu akumulátorů stává nezbytným.

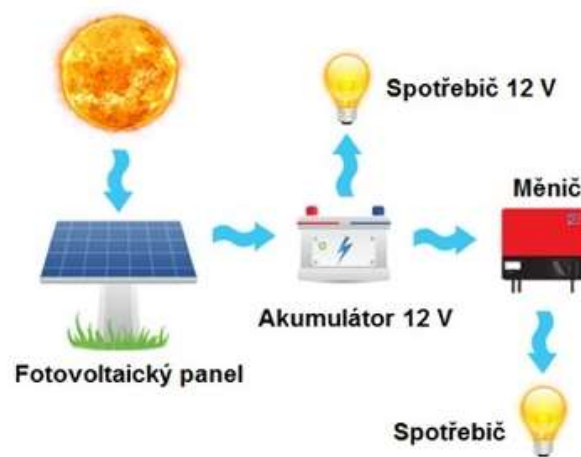
Při průzkumu trhu v segmentu domácích bateriových stanic lze dostupné systémy z hlediska jejich závislosti na připojení k distribuční síti rozdělit na on-grid a off-grid řešení. Dále lze systémy kategorizovat například dle způsobu zpracování a ukládání elektrické energie.

První běžnou aplikací je systém on-grid. Tento systém může být obvykle operován ve dvou základních aplikacích. První je aplikace, jejímž primárním využitím je pokrytí vlastní spotřeby elektrické energie (tzn. energetický soběstačná domácnost), ovšem s možností přetoků energie do distribuční sítě. Systémy v této aplikaci obsahují sestavu akumulátorů. Takto připojený objekt tedy případně může zajistit prodej přebytečné energie. Druhou hojně implementovanou aplikací zobrazenou na *Obr. 1* je přímé připojení do sítě bez jakékoliv možnosti akumulace elektrické energie. Tento systém je hojně využíván u samostatně stojících fotovoltaických elektráren. Veškerá vyrobená energie touto elektrárnou je tedy transformována a převáděna do rozvodné sítě.



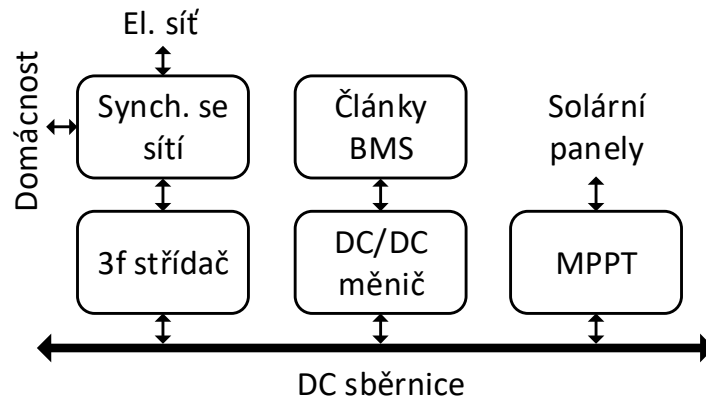
Obr. 1 On-grid systém s přímým připojením bateriové stanice do sítě bez možnosti akumulace energie

Druhým ze základních systémů je off-grid řešení (alternativně také „ostrovní režim“), které ilustruje Obr. 2. Jak již název napovídá systém není připojen do distribuční sítě. Jedná se tedy o čistě samostatně a izolovaně pracující elektrickou soustavu. Hlavním využitím těchto systémů jsou objekty, které nejsou připojeny k hlavní distribuční síti, přičemž důvodem může být nezbytná izolace systému či časové a finanční náklady spojené s realizací a udržováním přípojky. Systém tedy pracuje zcela samostatně a je vždy vybaven akumulací jednotkou pro zajištění dodávky elektrické energie i v případě, že obnovitelné zdroje nepokryjí vlastní spotřebu objektu.



Obr. 2 Off-grid systém bez připojení bateriové stanice do sítě a s možností akumulace energie

1.2 Architektura bateriové úložiště



Obr. 3 Blokové schéma domácí bateriové stanice

Ačkoliv se architektury bateriových úložišť mohou podle výrobce a zaměření mírně lišit, ukazuje Obr. 3 jednu z hojně používaných variant. Samotné silové připojení bateriového úložiště je ve formě jednofázového či třífázového střídavého rozhraní, které se připojuje do rozvodné skříně objektu. Bateriové úložiště pak může v souladu s možnými příklady aplikací uvedených v kapitole 1.1 pracovat v on-grid či off-grid režimu. Komunikační rozhraní pro monitorování a řízení parametrů provozu systému se pak obvykle vyskytuje ve formě přípojky k ethernetu či bezdrátového modulu Wi-Fi.

Jednotlivé výkonové měniče uvnitř zařízení jsou propojeny pomocí stejnosměrné sběrnice, do které je zapojen stejnosměrný obvod napětového střídače, DC/DC měnič určený pro nabíjení a vybíjení akumulátorů a také maximum power point tracker (MPPT).

Napětový střídač provozovatelný ve čtyřkvadrantovém režimu umožňuje ze stejnosměrné sběrnice energii odebírat, pro dodávání výkonu do domácnosti či distribuční sítě, a stejně tak také energii dodávat za účelem dobíjení akumulátorové sestavy, což je výhodné například v době nízkého tarifu signalizovaného pomocí hromadného dálkového ovládání (HDO).

V on-grid režimu (případně i v off-grid režimu s více mikrozdroji energie v daném ostrovním systému) je nezbytné používat blok pro synchronizaci se sítí. Tento blok pak umožňuje sfázování střídače se sítí za účelem paralelního provozu (tzn. posílení napájení objektu) či odprodeje energie do distribuční soustavy.

Akumulátory opatřené BMS systémy umožňují inteligentní využití a monitorování úrovně energie v jednotlivých článcích. Spolu s DC/DC měničem jsou pak tyto články dobíjeny ze stejnosměrné sběrnice či případně naopak do sběrnice energii dodávají tak, aby napětový střídač mohl generovat střídavý proud pro danou domácnost či distribuční síť.

MPPT měnič slouží za pomoci inteligentní algoritmicke k optimálnímu využití energie

generované připojenými solárními panely. Tuto energii následně MPPT převede na vhodnou napěťovou úroveň pro stejnosměrnou sběrnici.

Volitelnou jednotkou zařízení bývá často také humane-machine interface (HMI). Jedná se tedy o uživatelské rozhraní sloužící k obsluze zařízení. Toho zařízení nabývá obvykle podobu displeje a tlačítek na čelní stěně bateriové stanice či případně softwarové aplikace pro smartphony či webové rozhraní.

Jednotlivé bloky zařízení typicky sestávají ze silové a řídicí části. Pro realizaci měničů spadajících do silové části jsou typicky používány výkonové polovodičové prvky (tranzistory, diody či případně také tyristory) společně s budicími obvody. Silovou část doplňují také elektromechanické spínací prvky (stykače, relé, stejnosměrné odpínače apod.). V řídicí části jsou používány mikrokontrolery (MCU) určené právě pro řízení polovodičových výkonových měničů. Za tímto účelem jsou MCU vybaveny především velkou sadou čítačů/časovačů s velkým rozlišením a také specializovanými periferiemi pro generování tzv. wave-formů (tzn. požadovaných průběhů řídicích signálů).

Zařízení dále obsahuje značné množství měřicích obvodů nutných pro uzavření zpětnovazebních regulačních smyček. Výstupy těchto obvodů jsou dále zpracovávány také bezpečnostními obvody (signálové filtry a komparátory) monitorujícími nadlimitní úroveň napětí či proudů. Výstupy těchto komparátorů jsou dále společně s dalšími provozními signály (stav bleskojistek, odezva dalších systémových komponent, přebíjení článků signalizované pomocí BMS apod.) vyhodnocovány bezpečnostní logikou, která případně provede akční zásah omezující vznik škod na životě či majetku uživatelů.

1.3 Příklady bateriových úložišť dostupných na trhu

Na trhu se nachází systémy, které lze v základu zařadit do modulární či all-in-one kategorie. Zařízení spadající do all-in-one kategorie integruje v jedné sestavě veškeré potřebné komponenty pro plnohodnotný provoz domácí bateriové stanice, tzn. obsahuje střídač synchronizovatelný se sítí, akumulátorovou sestavu s monitorovacím systémem, uživatelské rozhraní ve formě aplikace pro smartphone a případně také výkonové měniče pro sběr energie z obnovitelných zdrojů. Modulární systémy obvykle znamenají nutnost pořízení samostatného střídače, který je přes stejnosměrnou sběrnici propojen s boxem obsahujícím akumulátorovou sestavu. Do tohoto systému lze pak připojit i obnovitelný zdroj energie přes samostatný měnič, a to buď se stejnosměrnou nebo střídavou výstupní vazbou. Jelikož je konstruovaný systém aktivního balancování a správy akumulátorů koncipován

právě pro all-in-one řešení, spadají všechny níže uvedené příklady domácích bateriových stanic právě do této kategorie.

1.3.1 Alpha ESS SMILE5

Tato bateriová stanice je standartním řešením typu all in one. Obsahuje dva MPPT měniče, které jsou schopny odebírat energii o výkonu necelých 14 kW. Kapacita bateriového uložení se pohybuje okolo 5,5 kWh. Výrobce využívá akumulátory s technologií lithium-železo-fosfát (LiFePO₄) a poskytuje záruku na bateriové články v délce 10 let.



Obr. 4 Bateriová stanice Alpha ESS SMILE5 [1]

1.3.2 Hansol AIO 7.2

Hansol je novým názvem pro produkty Samsung Energy Storage. Systém nabízí řešení se solárními měniči o maximálním výkonu 4 kW. Kapacita bateriového uložení čítá bezmála 6,5 kWh. Výrobce využívá technologii lithiových akumulátorů od firmy Panasonic a poskytuje desetiletou záruku na články či případně 6000 nabíjecích/vybíjecích cyklů.



Obr. 5 Bateriová stanice Hansol AIO 7.2 [2]

1.3.3 SOLTARO

Systém od Australské firmy Soltaro nabízí také kompaktní řešení. Výrobce nabízí 3 varianty měničů označených Hyper3KW, Hyper-3,68KW a Hyper-5KW. Nejslabší z měničů má možnost odebrat výkon ze solárních panelů až 3,9 kW, ovšem nejsilnější až 6,5 kW. Výrobce nabízí měniče se základním uložištěm 4,5 kWh a s možností navyšování této kapacity až na 22,5 kWh.



Obr. 6 Bateriová stanice SOLTARO [3]

1.3.4 EnergyCloud HOME

Modulární řešení tohoto výrobce nabízí nadstandardní variabilitu celého systému. Hlavním stavebním prvkem EnergyCloud systému je sice vždy all-in-one sestava měničů se základním bateriovým uložištěm o výkonu 7,6 kWh, nicméně k tomuto základu lze doplňovat další uložiště vždy o násobcích 7,6 kWh kapacity s celkovou limitací na 38 kWh. Výrobce však nabízí i individuální řešení nestandardních systémů. Solární měnič disponuje výkonem 5kW s možností rozšíření o další 5 kW modul. Výkon měničů, které dodávají energii do domácí sítě, se odvíjí od typu zařízení, a to v rozmezí 5,4 kVA (jednofázové řešení) až 16,2 kVA (třífázová varianta). Pro tento typ bateriových stanic je BMS systém popisovaný v dalších kapitolách navrhován.



Obr. 7 Bateriová stanice EnergyCloud HOME 38 [4]

2 Systémy pro řízení akumulátorů

Systém správy akumulátorů je jednou z nejdůležitějších součástí akumulátorové sestavy. Od funkcí a parametrů tohoto systému se mimo jiné částečně odvíjí i využitelná kapacita a energetická hospodárnost celé sestavy. Správné zacházení s akumulátorem nesouvisí pouze s dodržováním limitních úrovní napětí při provozu (nadměrné vybíjení, přebíjení), ale také s dodržováním přijatelných teplot a přesným měřením náboje (respektive energie) v článku.

2.1 Druhy akumulátorů pro bateriové uložení

Akumulátory pro domácí bateriová uložení nejsou na rozdíl od automobilových akumulátorů vystavovány vysoké pulzní zátěži. Je tedy nezbytné dimenzovat baterie spíše pro nižší, avšak dlouhodobější zatěžování. Důležitými parametry akumulátorů jsou zejména kapacita, napětí článku, životnost, dlouhodobá spolehlivost a bezpečnost provozu.

2.1.1 Olověné akumulátory

Olověné akumulátory jsou testovány již dlouhá léta v off-grid energetických systémech. Mají relativně krátkou životnost a menší možnou hloubku vybití (DoD) než ostatní typy akumulátorů. V sektoru bateriových stanic patří olověné akumulátory k nejlevnějším [5].

2.1.2 NiCd akumulátory

Nikl-kadmiové akumulátory mají dobré parametry (nízké samovybíjení, nezamrzají) pro užití v těchto zařízeních, ovšem jsou velkou zátěží pro životní prostředí. Obsahují škodlivé kadmium a dnes se již nevyužívají. Výhodou je značný zatěžovací proud (až 10 C), velké rozmezí pracovních teplot a dlouhá životnost. Akumulátory jsou odolné vůči přebíjení a nadměrné vybíjení. Nevýhodou je však nízká hustota energie a prudký pokles napětí před vybitím článku [6].

2.1.3 NiMH akumulátory

Nikl-metal hydridové akumulátory byly značně rozšířené, neboť neobsahovaly škodlivé kadmium a zároveň měly vyšší hustotu energie. Tento typ akumulátorů však nabízí pouze malý rozsah pracovních teplot a nízkou životnost. Dále mají články velkou vnitřní impedanci, která značně omezuje vybíjecí proud. Tyto články se využívaly v trakčních aplikacích [6].

2.1.4 Lithiové akumulátory

Lithiové články jsou trendem poslední doby. Mají široké využití od spotřební elektroniky až po trakční systémy. Obecně se vyznačují vysokou efektivitou nabíjení/vybíjení (dále jen efektivita) a dobrou hustotou energie [6].

2.1.4.1 Li-Ion

Lithium-Iontové akumulátory nabízí vysokou hustotu energie a jejich zatěžovací proudy mohou dosahovat 2 C až 3 C. Akumulátory však po čase ztrácí svou kapacitu a jsou citlivé na vysoké teploty. Při podbíjení článků hrozí jejich zničení [7].

2.1.4.2 Li-Pol

Lithium-polymerové články jsou dalšími zástupci z rodiny lithiových akumulátorů. Tyto články se vyznačují nízkou hmotností a možností tvarovatelnosti. Mají také vysokou efektivitu a vysokou hustotu energie. Nepříjemnou vlastností těchto článků je ovšem možnost exploze při přetížení. Dalším negativem je nízká životnost [7].

2.1.4.3 LifePO₄

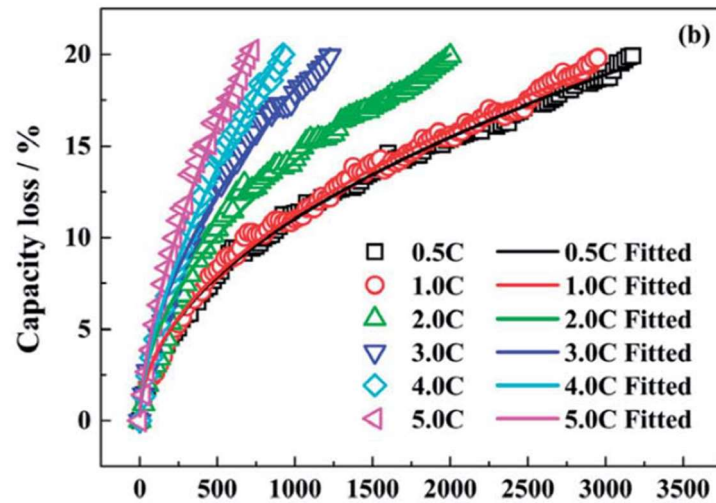
Lithium-železo-fosfátové články patří jednoznačně mezi jedny z nejrozšířenějších akumulátorových článků. Jsou charakteristické svou efektivitou, která je až 95 %. Vysokou efektivitu dodává bateriím malý vnitřní odpor. Akumulátory jsou bezpečné i v případě použití v extrémních podmínkách. Dalším jejich důležitým parametrem je jejich dlouhá životnost. Tyto parametry jsou však vykoupeny vyšší pořizovací cenou [7].

2.2 Druhy nevyváženosti akumulátorů

Napětíové nevyváženosti systému s sebou přináší nejen omezení z hlediska využití maximální možné kapacity bateriového uložení, ale je zde také velký problém v podobě možného přebíjení a nadměrné vybíjení jednotlivých článků. Vzhledem k výrobním tolerancím nemají články identickou kapacitu a dá se tedy konstatovat, že nevyváženost jednotlivých článků je konstrukčně definována již po koupi nových článků. Z principiálního hlediska lze rozdělit napětíové nevyváženosti článků do dvou kategorií, a to na napětíovou diferenci z důvodu výrobních tolerancí a napětíovou diferenci způsobenou stárnutím článku.

Nevyváženost daná výrobní tolerancí ovšem není obvykle nikterak závažným problémem. Tato neshoda je dána jednak výrobním procesem článků v dané sérii a jednak odebranou sérií akumulátorů. Především problémům plynoucích z uvedených skutečností ovšem lze celkem snadným způsobem. Při řazení jednotlivých článků do akumulátorových sestav je třeba ověřit jejich základní parametry (kapacita, vnitřní odpor) a rozdělit akumulátory do několika skupin s definovaným rozptylem hodnot. Následně je vždy pro kompletní akumulátorovou sestavu nutné volit články z jedné takovéto skupiny [8].

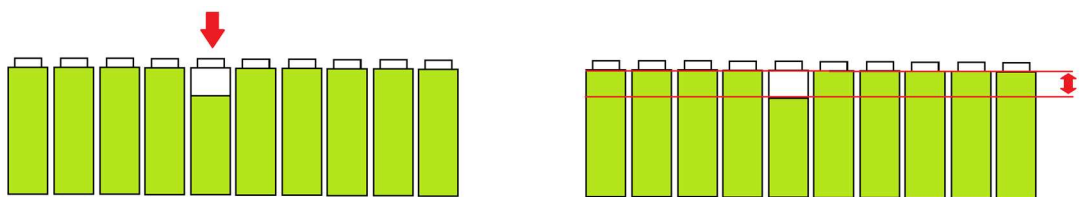
Dalším zdrojem napětíové nevyváženosti článků je také proces stárnutí, ať už z hlediska chronologického či z hlediska počtu nabíjecích/vybíjecích cyklů a zatěžování. Tyto procesy vedou k poklesu kapacity a nárůstu vnitřního odporu článku.



Obr. 8 Ztráta kapacity LiFePO4 článků v závislosti na počtu cyklů pro různé stupně zátěže [9]

Z grafu na Obr. 8 je patrné, že jednotlivé články ztrácí svou kapacitu úměrně se zatěžováním. Důležitým faktem je, že pokud jsou články zatěžovány stejným způsobem, snižuje se jejich kapacita proporcionálně. Lze tedy konstatovat, že v případě nutné výměny akumulátoru je třeba měnit kompletní akumulátorovou jednotku, a nikoliv jen několik konkrétních článků. V tomto případě by došlo k rozvážení přibližně stejně zestárlé akumulátorové sestavy. Ignorováním této skutečnosti by bylo nadměrné zatěžování balancujících obvodů, čemuž lze předejít vhodnou strategií servisní technologie akumulátorové stanice [10], [11].

Důvodem pro rozvážení akumulátorového celku může být také nedostatečný servis akumulátorové stanice. Pokud se v akumulátorové sestavě začnou po opotřebování servisovat výměnou jednotlivé články může dojít k razantním nepoměřům v jejich kapacitách.



Obr. 9 Akumulátorová sestava se zařazeným novým článkem

Obr. 9 představuje případ nevhodně servisované akumulátorové sestavy. V uvedeném případě došlo k výměně jednoho z článků na nový, který bude mít přirozeně podstatně vyšší kapacitu. Tento způsob rozvážení kapacit jednotlivých článků celého akumulátoru je nejnepríznivějším případem pro vyvažovací obvody akumulátorové stanice. Pro pasivní BMS systémy bude náhrada jednoho článku za nový kus znamenat značnou tepelnou ztrátu při dobíjení sestavy, jelikož všechny ostatní články budou již dosahovat definované úrovně nabití, zatímco článek nový nikoliv. V případě aktivního BMS bude systém velmi vytěžován zejména při nízké úrovni energie ve člancích, kdy bude nový článek dotovat články ostatní.

2.3 Vyvažování článků

I přes vhodné rozřazení akumulátorových článků do skupin dle naměřených parametrů je nezbytné jejich energii stále vyrovnávat. Odchytky kapacit jednotlivých článků se vlivem nabíjecích a vybíjecích cyklů zvyšují, což může postupně vést ke značnému rozvážení celé akumulátorové sestavy. Balancování sestavy je tedy vhodné provádět v průběhu každého cyklu. K vyrovnání energií akumulátorů napomáhají obvody BMS, které lze rozdělit na aktivní a pasivní.

Pasivní balanční obvody se vyznačují zejména svou jednoduchostí a nízkou cenou. Tato skutečnost je však vykoupena velice nízkou účinností, a tedy značnými tepelnými ztrátami, které jsou produkovány balančními rezistory.

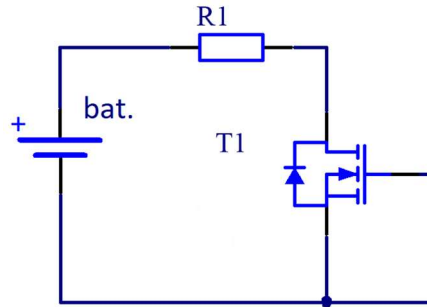
Bateriový systém vybavený aktivními balančními obvody je v porovnání s pasivními složitější, náročnější na algoritmizaci a komplexní návrh. Důležitým (a mnohdy rozhodujícím faktorem) při nasazení aktivního BMS je také výrazně vyšší cena. Velice důležitým důvodem pro nasazení aktivního BMS je však vysoká účinnost systému a také prodloužení doby provozu zařízení, jelikož nejslabší článek při použití aktivního BMS nelimituje provoz celé sestavy.

2.3.1 Pasivní BMS

Sestava akumulátorů vybavená pasivním BMS zpravidla používá vyvažovací rezistory paralelně připojené k jednotlivým článkům v situaci, kdy napětí článku při nabíjení dosáhne definované úrovně. Jednoznačnou nevýhodou pasivního balančního obvodu je typicky možnost balancování akumulátorových článků pouze při dobíjení sestavy (tzv. top level balancing). Vzhledem k použitému obvodovému zapojení by bylo neefektivní vyvažovat články v průběhu zatěžování bateriové stanice.

Budou-li články před sestavením akumulátorové sestavy rozděleny do skupin a vhodně sestaveny, účinnost celého systému bezpochyby vzroste, jelikož rozdíly v kapacitách článků ze stejné skupiny při stejném zatěžování se s počtem cyklů výrazně nerozcházejí [10]. Vyvažovací rezistory bývají ke článkům obvykle připínány pomocí metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET) tranzistorů, jak naznačuje *Obr. 10*. Řízení samotných pasivních BMS může být tvořeno diskretním MCU nebo lze využít specializovaných integrovaných obvodů (IO) navržených přímo pro BMS. I přes to, že některé obvody nabízí již interní spínací prvky pro balancování, je pro vyšší hodnoty vyvažovacích proudů doporučeno použití externích spínacích polovodičových prvků. Tyto obvody lze dále dělit na „analogové“ a „digitální“. Toto rozdělení charakterizuje zpracování

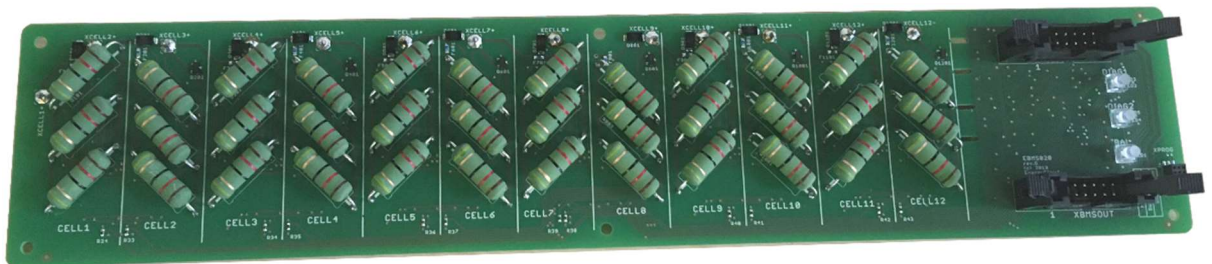
a vedení signálů pro měření a diagnostiku. Mimo měření napětí je v mnoha případech také měřen vybíjecí (balanční) proud a teploty uvnitř jednotlivých akumulátorových modulů. Měření teplot je u pasivních BMS velmi důležité, jelikož je daný modul ohříván nejen proudovým zatěžováním jednotlivých článků, ale také případnou výkonovou ztrátou vznikající během balancování.



Obr. 10 Princip pasivního BMS

Analogové pasivní BMS zpracovávají signály zpravidla operačními zesilovači či komparátory přímo v místech měření. Pro určování aktuálních stavů článků je využíváno přesných napěťových referencí použitých jako prahové úrovně pro Schmittovy klopné obvody. Celý systém obsahuje tedy značné množství analogových komponent, které vyžadují neustálé napájení a zpravidla nebývají optimalizovány na spotřebu. Takto zmařená energie využitá na napájení vyhodnocovacího systému je však jen zlomkem množství energie, která je vyhřívána v případě balancování jednotlivých článků.

Digitální pasivní BMS obsahují v místech měření analogově-digitální (A/D) převodníky a celý systém je tedy řízen digitálně. Pro komunikaci mezi akumulátorovými moduly se obvykle používá sběrnice typu daisy-chain s oddělením pomocí kondenzátorů či usměrňovacích diod. Modul s nejnižším potenciálem (tzn. nejbliže k zápornému pólu akumulátorové sestavy) bývá typicky vybaven rozhraním Serial Peripheral Interface (SPI) [12]. Informace předané po SPI sběrnici jsou následně zpracovány a vyhodnoceny v dedikovaném MCU. Jedná se tedy o energeticky efektivnější a ve výsledku i levnější řešení z hlediska materiálových nákladů. Samotný návrh systému je inženýrsky náročnější než v případě analogové verze. Tím klesá vlastní spotřeba celého systému.



Obr. 11 Pasivní BMS pro 12 článků – produkt společnosti EnergyCloud, a.s.

2.3.2 Aktivní BMS

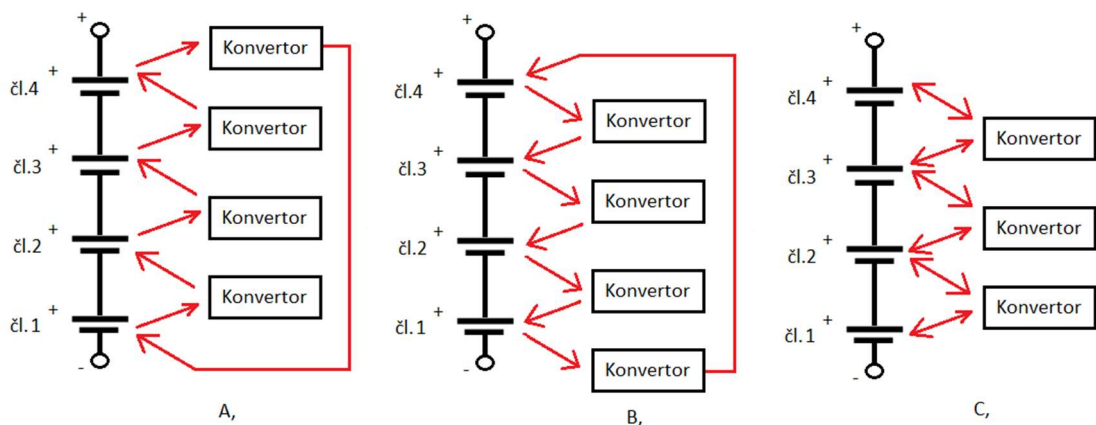
Aktivní systém vyvažování akumulátorů je moderní a dnes již poměrně hojně využívaný. Tento systém se vyznačuje především schopností redistribuovat energii mezi jednotlivými články při vyvažování akumulátorové sestavy. V případě aktivního BMS lze však vyvažovat nesouměrnost akumulátorové sestavy jak při nabíjení, tak při vybíjení. Na rozdíl od pasivního BMS se tedy aktivní řešení vyznačuje značně vyšší účinností balančního systému a doby provozu zařízení v případě citelného rozvážení článků v sestavě. Aktivní BMS je z pravidla řešeno pomocí DC-DC měničů. To s sebou přináší využití značného množství spínacích polovodičových prvků a typicky také prvků indukčních (flyback transformátory). Je tedy zřejmé, že aktivní balanční obvody budou finančně náročnější než v případě pasivního řešení [13].

2.3.2.1 Způsoby přenosu energie

Možnost přenosu energie napříč akumulátorovou sestavou je stěžejní vlastností aktivního BMS. Pro samotný přenos energie existuje několik možných způsobů popsaných níže.

2.3.2.1.1 Mezi sousedními články

Tento typ balancéru redistribuuje energii vždy mezi sousedními články. Směr toku energie závisí na typu použitého měniče a může být jednosměrný (vzestupný/sestupný) či obousměrný. U jednosměrných měničů nastávají vždy potíže u krajních článků v sestavě. V případě uspořádání článků s vzestupným měničem na se jedná o spodní článek (tzn. blízko zápornému pólu sestavy), jehož měnič totiž musí být schopen dodat energii článku hornímu, což znamená velký napěťový rozdíl, a tedy velký počet konverzí. Energetický tok tedy musí tvořit pomyslné kolečko. Analogický problém nastává také u varianty se sestupným tokem energie. Variantou s obousměrnými měniči lze přenos energie značně zefektivnit.

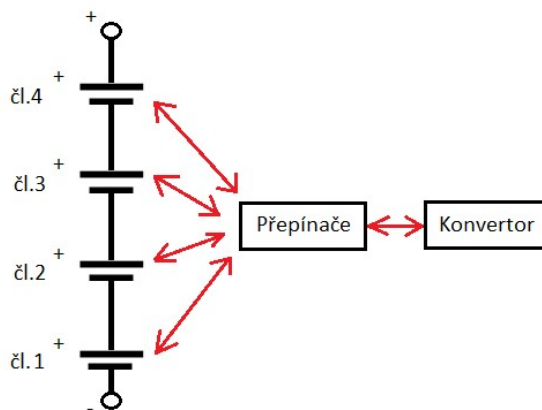


Obr. 12 Princip přenosu energie mezi sousedními články: a) vzestupné měniče, b) sestupné měniče, c) obousměrné měniče [8]

Z obrázku *Obr. 12* jsou patrné toky energií pro jednotlivé verze systémů. Měníče, které pracují vždy pouze mezi sousedními články, nemají vysoké nároky na napěťový offset a jsou tedy ve většině případů tvořeny neoddělujícími měniči. Tato skutečnost platí pro všechny tři varianty systémů balancování. Ovšem měnič, který u varianty a) a b) pracuje vždy mezi prvním a posledním článkem celé sestavy, má zvýšené nároky na napěťový offset. Je tedy tvořen převážně oddělujícím měničem s využitím transformátoru. Varianta c) obsahuje obousměrné měniče, a obejde se tedy bez složitějšího měniče. Tato vyvažovací metoda ovšem není vhodná pro rozsáhlé soustavy článků. Pokud budou výrazně kapacitně odlišné články od sebe vzdáleny přes větší množství článků, bude se energie přenášet přes všechny tyto články. Každý měnič pracuje s určitou účinností a je tedy zřejmé, že přenos energie přes větší množství měničů nebude energeticky výhodný.

2.3.2.1.2 Mezi libovolnými články s pomocí přepínače

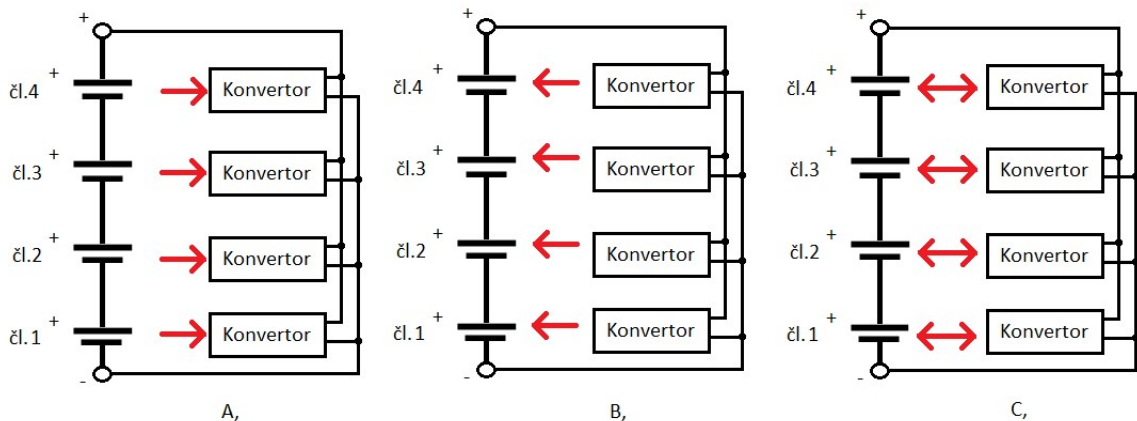
Řešení na *Obr. 13* využívá k balancování pole přepínačů ve formě multiplexoru. S jejich použitím k jednotlivým článkům dojde k výraznému omezení počtu měničů. Malé sestavy článků si vystačí dokonce s jedním měničem. Výhodou tohoto systému je skutečnost, že lze přenášet energii přímo mezi články s největším rozdílem akumulované energie. Vzhledem k výraznému omezení počtu měničů je tato varianta také v porovnání s ostatními o poznání levnější. Ačkoliv se tato metoda jeví jako výhodná, má i svá negativa. Jedním z nich je doba, která je nutná pro vybalancování celého akumulátorového systému. Se snížením počtu měničů tato doba pochopitelně narůstá enormním způsobem. Je zřejmé, že měnič v jednom „přebíjecím“ cyklu může pracovat pouze se dvěma články.



Obr. 13 Princip přenosu energie mezi články v sestavě s pomocí přepínače [8]

2.3.2.1.3 Mezi článkem a celou sestavou

Následující systém vyvažování energií pracuje mezi jednotlivými články a celou sestavou akumulátorových článků. Za pomoci měničů je energie transformována buďto jednosměrně nebo obousměrně. Kvůli vysokému napěťovému offsetu je nutné pro tuto variantu vyvažování článků využít izolované měniče. Jednoznačnou výhodou celého systému je rychlost možného vyrovnání energetické rozváženosti. Tato vlastnost je vykoupena jednak účinností jednotlivých měničů a také jejich cenou.

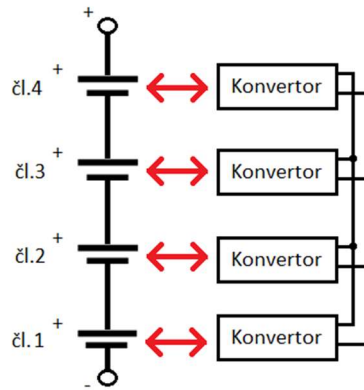


Obr. 14 Princip přenosu mezi jednotlivými články a celou sestavou: a) z článku do sestavy, b) ze sestavy do článku, c) obousměrný přenos mezi články a sestavou [8]

Z Obr. 14 jsou patrné jednotlivé energetické toky. V případech a) a b) jsou použity měniče jednodušších konstrukcí, které umožňují energii přenášet pouze jedním směrem. Systém vybavený pouze jednosměrně pracujícími měniči bude vyvažovat rozváženou akumulátorovou sestavu o poznání déle, než systém c), u něhož je využito obousměrných měničů. Tento systém bude tedy vyvažovat články nejrychleji, ovšem za cenu vyšších nákladů.

2.3.2.1.4 Mezi články a sběrnici

Systém využívající pro vyrovnání energetického stavu nezávislou napěťovou sběrnici se zdá být vhodnou úpravou předchozí varianty. Jednotlivé články za pomoci měničů do této sběrnice svou energii předávají nebo ji naopak odebírají. Vhodným řízením lze docílit velice efektivního vyrovnávání energie v jednotlivých člancích. Jednoznačnou nevýhodou je nutnost využití obousměrných měničů.



Obr. 15 Princip přenosu energie mezi články a sběrnici [8]

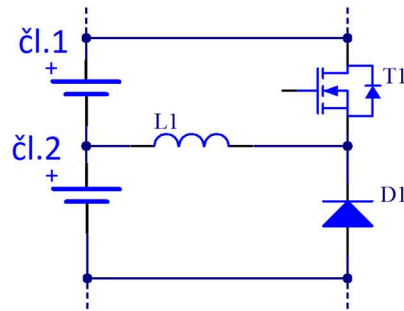
Z Obr. 15 je patrný efektivní přenos energie. Úroveň napětí stejnosměrné sběrnice je vhodné dimenzovat dostatečně vysoko, jelikož by jinak mohlo docházet k nadměrným výkonovým ztrátám daným vysokým proudovým odběrem společně s impedancí sběrnice.

2.3.2.2 Měníče pro přenos energie

Elektronické obvody pro distribuování energie mezi jednotlivými články mohou být založeny na různých principech a topologiích. Jednou z méně používaných metod je využití přepínání (a tedy přebíjení) kondenzátorů. Přenos energie za pomoci kondenzátorů s sebou přináší mnohá úskalí. Především není možné, aby energie odebraná ze článku nabývala vyšší napěťové úrovně, než má samotný článek. Tato limitace není podstatná v případě, že energie je distribuována na krátkou vzdálenost, ovšem při využití přenosu energie s pomocí sběrnic se stává neefektivní. Dalším problémem je nutnost využití tlumivek pro okamžité dodávání energie do dobíjeného akumulátoru, jelikož se zanedbáním ohmických ztrát je nárazový proud omezen prakticky jen podélnou indukčností. V případě vysokého nárazového proudu je nutné dostatečně dimenzovat nejen spínací obvody, ale také vodiče přenášející energii.

Mezi další (a podstatně využívanější) prvky pro přenos energie mezi jednotlivými články patří induktory. Na rozdíl od kondenzátorů je induktor akumulacním prvkem, jehož stavová veličina je proud, z čehož plyne, že za použití vhodných variant zapojení měničů bude tento prvek velice žádoucí z důvodu možné variability výstupního napětí, a tedy bezproblémového využití varianty balancování za pomoci sběrnic. Z tohoto důvodu se budou následující čtyři podkapitoly zaměřovat na topologie využívající indukčních prvků.

2.3.2.2.1 Měníč BUCK

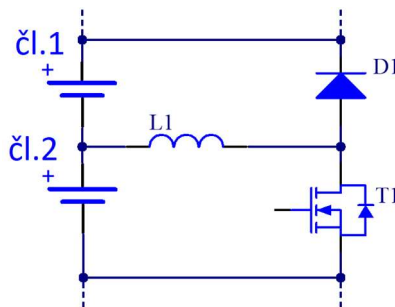


Obr. 16 Buck topologie

Jednosměrný snižující měnič na Obr. 16 využívá základních vlastností induktoru a pracuje ve dvou stavech. V prvním stavu, kdy je sepnutý tranzistor T1, začne tlumivkou procházet proud. Následně je ve vhodný okamžik tranzistor T1 rozepnut a proud tekoucí tlumivkou se začne uzavírat přes čl. 2 a diodu D1 [14].

2.3.2.2.2 Měníč BOOST

Další možností efektivního balancování je varianta využívající zvyšující boost měnič. Je tedy zřejmé že výstupní napětí tohoto měniče bude vyšší než napětí vstupní. Měníč je schopen pracovat pouze v jednom směru.

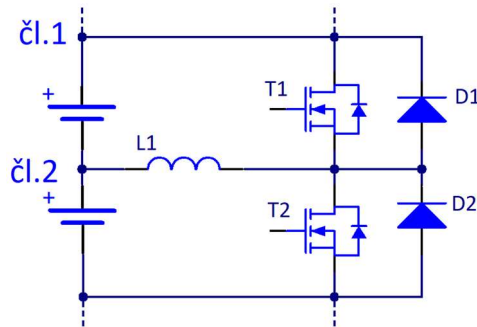


Obr. 17 Boost topologie

Boost měnič zobrazený na Obr. 17 opět využívá pro svou činnost akumulační schopnost tlumivky. Zařízení pracuje ve dvou stavech, mezi kterými přechází pomocí spínacího tranzistoru T1. V prvním stavu je tranzistor sepnutý a čl. 2 společně s tlumivkou L1 uzavírají obvod. Po rozepnutí tranzistoru se proud začne uzavírat přes diodu D1. Tím se tedy energie z čl. 2 začne přenášet do čl. 1 [14].

2.3.2.2.3 Měníč BUCK-BOOST

Tato topologie integruje vlastnosti obou předchozích měničů do jednoho obvodu a umožňuje tak obousměrný tok energie. Měníč na Obr. 18 lze tedy využít v topologii popsané v kapitole 2.3.2.1.1 jako obousměrný balancér energie mezi sousedními články.

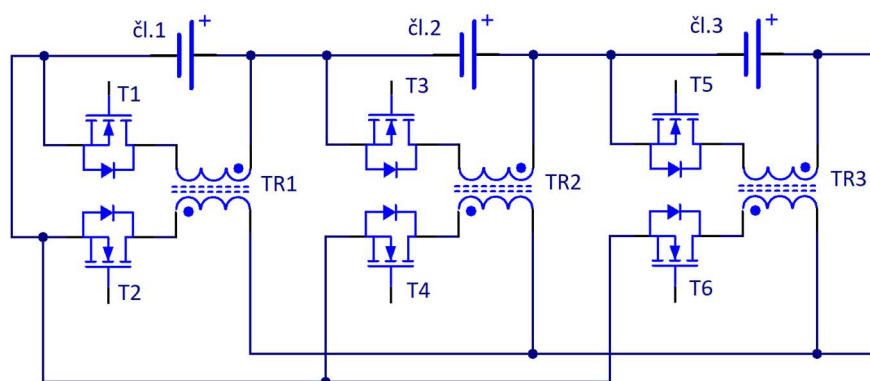


Obr. 18 Buck-Boost topologie

Výhodou tohoto typu obousměrného měniče je relativně nízká cena. Na každý článek připadá jeden tranzistor, dioda a na vybrané dvojice také tlumivka. Podle rozsahu a potřeb celého systému je vhodné doplnit zapojení o měření napětí jednotlivých článků a případně také o měření balančních proudů [14].

2.3.2.2.4 Měnič flyback

Tento typ měniče využívá jako základ flyback transformátor a díky němu lze elektrickou energii přenášet obousměrně. Flyback transformátor má ve svém jádře vzduchovou mezeru a umožňuje tak akumulaci energie. Plní také funkci galvanické izolace mezi primárním a sekundárním vinutím. Samotný flyback měnič se také někdy označuje jako blokující, přičemž důvodem je jeho přenos energie transformátorem. V modelové situaci pro první článek na Obr. 19 je totiž v první fázi při sepnutí tranzistoru T1 energie akumulována v transformátoru TR1 a její přenos do sekundárního vinutí je blokován tranzistorem T2 (proud sekundárním vinutím je tedy nulový). V okamžiku rozepnutí T1 dojde ke změně polarity na sekundárním vinutí TR1 a tranzistorem T2 (případně jeho substrátovou diodu) začne protékat proud. To, zda proud v tomto okamžiku protéká sepnutým tranzistorem T2, či pouze jeho substrátovou diodou, záleží na tom, zda je měnič provozován v synchronním či asynchronním režimu.



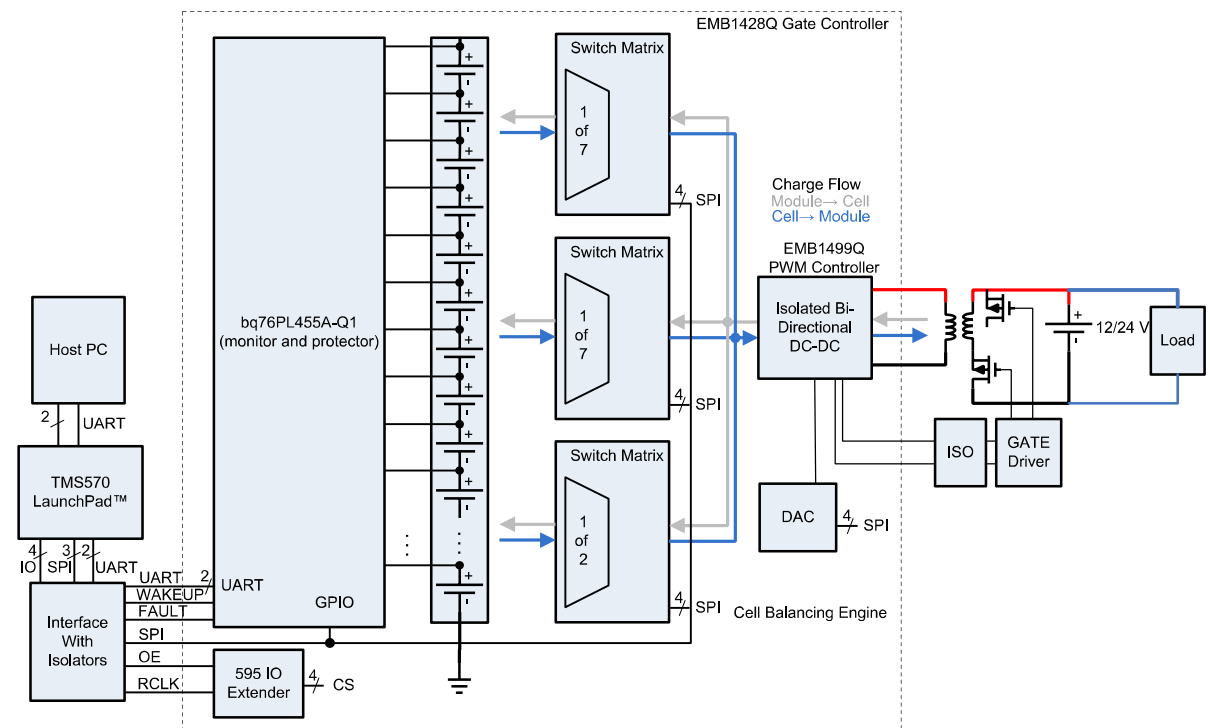
Obr. 19 Flyback topologie

Energie přenesená transformátorem je obvykle vhodně řízena dvojicí tranzistorů. Tento typ měničů je tedy vhodný i pro balancování za pomoci společné sběrnice. Při vhodném řízení dochází k efektivnímu přenášení energie mezi jednotlivými články. Při velké sestavě lze rozdělit sběrnice do několika částí a tím předejít problémům s dimenzováním komponent zapojených do sběrnice transformátorů [14].

2.3.2.3 Topologie řešení aktivních BMS

Někteří výrobci integrovaných obvodů zaměřující se na aplikace v napájecí a nabíjecí technice nabízejí ve svém portfoliu i obvody určené přímo pro aktivní BMS. V následujících třech kapitolách byly proto po rešerši vybrány a popsány obvody od firem Texas Instruments, Analog Devices a porovnány s diskretním řešením.

2.3.2.3.1 Texas Instruments

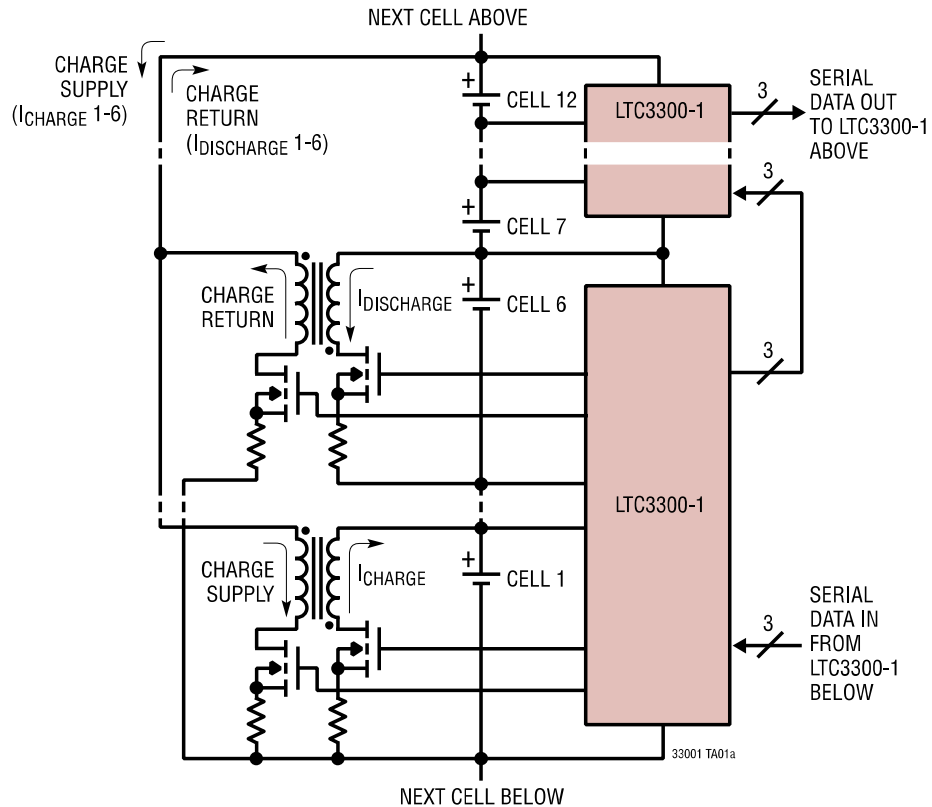


Obr. 20 Aktivní BMS řešení společnosti Texas Instruments [16]

Architektura na Obr. 20 používá k aktivnímu balancování až šestnácti článků jeden plně izolovaný obousměrný DC/DC měnič řízený obvodem EMB1499Q [17]. Propojování jednotlivých článků s měničem je realizováno pomocí přepínací matice EMB1428Q, která umožňuje vybrat vždy jeden ze sedmi možných článků [18]. Pro monitorování stavu akumulátorů a detekci případných problémů s obvodovou funkcí je použit IO BQ76PL455A [19]. Takto navržený systém je díky parametrům součástek omezen na 60 V. S přestavbou architektury na vyšší počet článků a větší napětí značně roste komplexita řešení i jeho cena

(izolátory komunikační sběrnice, velké množství IO a výkonových polovodičů na jednotlivých akumulátorových modulech atd.). Teoretickým maximálním rozsahem akumulátorové sestavy je propojení šestnácti takto vytvořených BMS systémů. Tento limit je dán komunikačním rozhraním serial peripheral interface (SPI) ve formě daisy-chainu.

2.3.2.3.2 Analog Devices

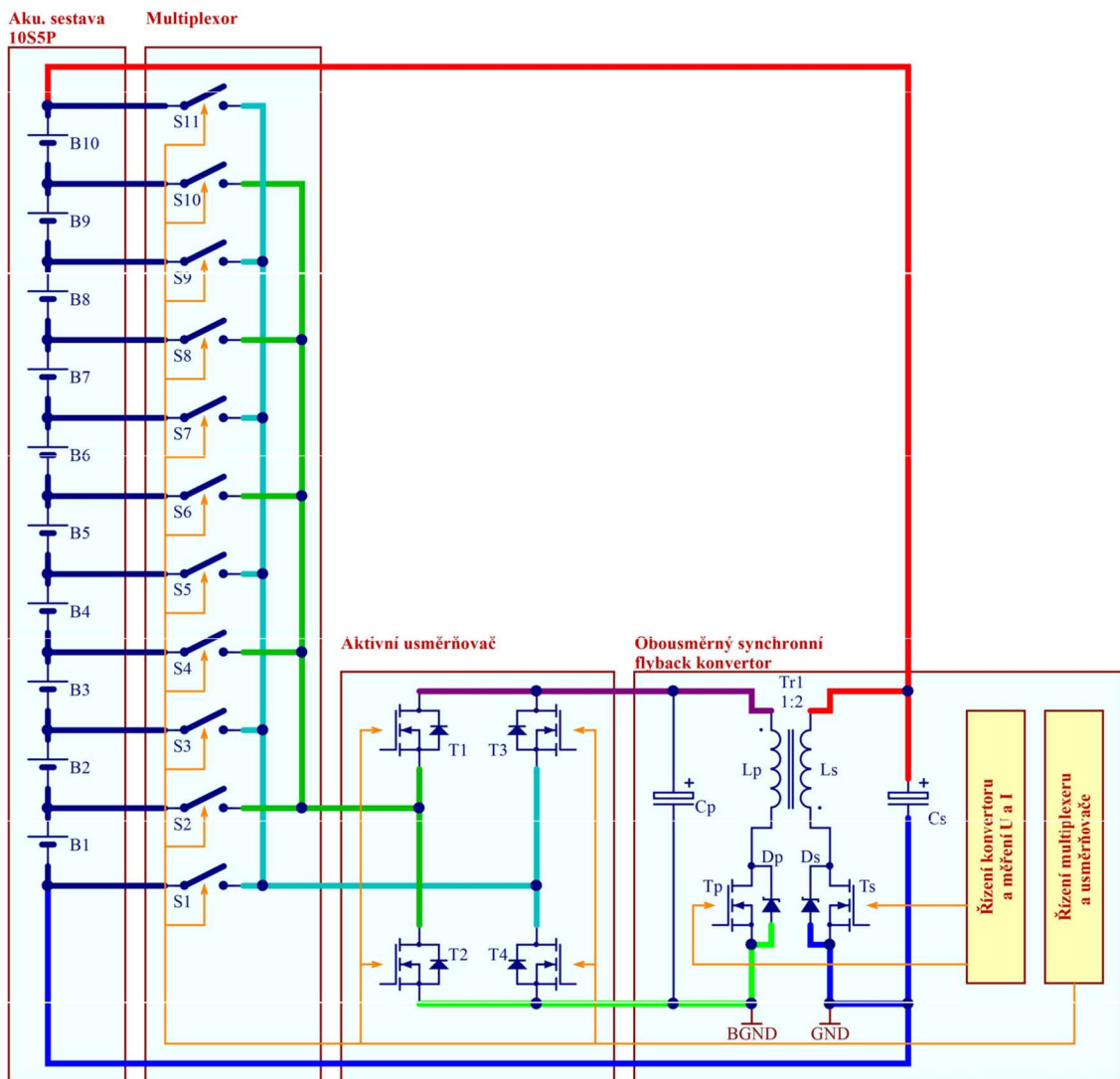


Obr. 21 Aktivní BMS řešení společnosti Analog Devices [20]

Obr. 21 představuje řešení založené na využití balancérů LTC3300-1 [20]. V praxi tyto balancéry ještě velmi vhodně doplňují obvody pro ochranu a monitorování z řady LTC6803 [21]. Každý z balancérů může být použit pro šest článků a typicky se zapojuje v topologii umožňující obousměrné vyvažování mezi společnou sběrnici akumulátorové sestavy (respektive jedním modulem) a jednotlivými články. Každý článek je tedy vybaven separátním obousměrným flyback měničem. Obvody LTC6803 slouží k preciznímu monitorování (a případnému pasivnímu balancování) až dvanácti článků. Balancéry i monitorovací obvody je možno propojit pomocí rozhraní SPI do daisy-chainu a dosáhnout tak velmi rozsáhlých akumulátorových sestav o napětí stovek voltů.

2.3.2.3.3 Diskrétní řešení

Jednu z možných architektur z diskretních součástek ukazuje *Obr. 22*, na kterém je použit obousměrný flyback měnič pro vyvažování mezi jednotlivými články a sestavou. Konkrétní článek je vybírán výkonovým multiplexorem využívajícím MOSFET tranzistorů a půlmůstkových budičů. Nezbytnou součástí této topologie je také aktivní usměrňovač mezi výkonovým multiplexorem a flyback měničem z důvodu redukce ztrát. K řízení balancéru (tzn. multiplexor, aktivní usměrňovač a flyback měnič) je použit MCU se speciálními časovači určenými pro aplikace ve výkonové elektronice. Balancér je nutné doplnit o další monitorovací a bezpečnostní obvody za účelem sledování limitních parametrů systému [8].



Obr. 22 Aktivní řešení BMS sestaven z diskretních prvků [8]

Takového řešení umožňuje optimalizovat cenu systému, ale je také velmi náročné z hlediska návrhu, ladění a testování. Implementovat výše popisovanou architekturu do velkých akumulátorových sestav se jeví jako problematické.

3 Algoritmy pro vyvažování akumulátorových sestav

V případně rozdílů v úrovni energie jednotlivých článků v akumulátorové je nutné provést jejich vyvážení. Jelikož je v sériové kombinaci článků nabíjecí (respektive vybíjecí) proud vždy stejný pro všechny články, je nutné pro vyvážení sestavy používat balancéry. Vyvažovací algoritmy lze dělit dle mnoha hledisek, nicméně pro základní přiblížení postačí definovat dvě kategorie popsané níže [8].

3.1 Rozdělení dle výkonu

Tento typ algoritmů lze dále rozdělit na kondiční a energetické vyvažování. V první uvedené kategorii se jedná o potlačení vlivu přepětí a teploty na degradaci parametrů článku a jde tedy vlastně o state of charge (SOC) vyvažování prováděné při nabíjení sestavy (tzn. top balancing). Samotné SOC (stav nabití akumulátoru) je definováno jako poměr aktuální hodnoty náboje k maximální kapacitě článku a je tedy inverzním parametrem k dept of discharge (DoD, hloubka vybití). Pro kondiční vyvažování postačují balancéry s malým výkonem typicky ve formě pasivního BMS. Naproti tomu je energetické balancování implementováno vždy ve formě aktivních balancérů, které se správnou algoritmizací slouží k vyrovnání SOC i kapacit během nabíjecího i vybíjecího procesu [8].

3.2 Rozdělení podle stavu nevyváženosti

Tuto podskupinu algoritmů lze rozdělit na vyvažování dle napětí a dle SOC. První případ je implementačně jednoduchý, často používaný a lze ho používat v reálném čase. Tento algoritmus vychází z měření napěťových diferencí mezi články, nicméně jeho přesnost je značně ovlivněna aktuálním zatížením akumulátorové sestavy a vnitřním odporem jednotlivých článků. U článků protékaných proudem nelze v případě zátěže vzájemně rozlišit vliv SOC a úbytku napětí na vnitřním odporu. V případě ignorování tohoto faktu se může zdát, že došlo k nevyvážení SOC a k zapojení balancéru pro korekci, který ovšem bude vyvažovat i vliv vnitřního odporu, což povede k SOC nevyváženosti. Následně pak může dojít po odlehčení zátěže k nárůstu open-circuit voltage (OCV, napětí článku naprázdno) do takové míry, že zareagují ochranné prvky obvykle integrované v monitorovacích obvodech. Balancéry pak tedy mohou paradoxně při nesprávné aplikaci vést k nevyváženosti článků (SOC, OCV), k jejich zrychlenému stárnutí (degradaci) plynoucí z případného přepětí a také k nežádoucím energetickým ztrátám (potažmo ke snížení účinnosti systému). Tento problém lze eliminovat v případě, že je balancér zapnut až v závěrečné fázi nabíjení, kdy je nabíjecí proud nižší, a tedy vliv vnitřního odporu článku menší. Vyvažování v době nízkého proudového zatížení sestavy s sebou nepřináší žádné velké potíže, je-li toto vyvažování

prováděno před ukončením nabíjecího procesu. V ostatních oblastech nabíjecího či vybíjecího cyklu je pro správné vyvážení sestavy po ukončení nabíjecího procesu nutné použít prediktivní balancování.

Vzhledem k malým hodnotám vyvažované energie u pasivního BMS lze v průběhu několika nabíjecích cyklů dosáhnout rovnováhy i s použitím malých proudů. U aktivního BMS dochází k vyvažování většího množství energie v průběhu každého cyklu a za tímto účelem musí být tedy použity větší proudy, což vede ke zvyšování chyby zapříčiněné vnitřním odporem článku. Nevhodné použití této metody může vést k rychlému přenosu energie do a z článku, jelikož řídicí a monitorovací obvody budou rychle reagovat na změny napětí článků. Díky tomu pak hrozí nadměrná energetická ztráta ve vyvažovacích obvodech vedoucí k vysokému zahřívání a případně i k nestabilitě řídicích obvodů. Lepší metodou pro efektivnější využití navržených obvodů je rozprostřít eliminaci nevyváženosti SOC i kapacit do průběhu nabíjecího a vybíjecího cyklu a nespokojit se jen s vyvažováním v blízkosti konce nabíjecího cyklu. Nevýhodou aplikace této metody prediktivního vyvažování je složitější algoritmizace přesně určující nutné množství energie, které musí být přesunuto mezi akumulátory bez ohledu na napětí článků.

4 Návrh BMS

Pro samotný návrh zařízení bylo potřeba nejdříve definovat požadované parametry a funkce plynoucí z konkrétní akumulátorové sestavy. Byla provedena také rozvaha nad typickou spotřebou energie z domácí bateriové stanice, neboť právě její používání společně s odhadovaným rozptylem mezi parametry článků ve výsledku definuje požadovaný výkon aktivních balancérů. Po těchto úvodních krocích následoval výběr architektury balančního a monitorovacího systému a doplnění o nezbytné řídicí a komunikační obvody.

4.1 Akumulátorová sestava

Základem uvažované akumulátorové sestavy je LiFePO_4 článek ZG-LF020A [22]. Mezi pozitiva těchto akumulátorů patří především delší životnost, chemická a teplotní stabilita, bezpečnost, vysoká stabilita výstupního napětí při vybíjení a přívětivost k životnímu prostředí (netoxické, bez vzácných kovů). Některé další výhody sdílí LiFePO_4 technologie s Li-ion akumulátory: nízké samovybíjení, žádný paměťový efekt, rychlé nabíjení, nízké nároky na údržbu a absence nutnosti formátovat akumulátor v průběhu jeho životního cyklu. Mezi uváděné nevýhody se řadí nízká energetická hustota, horší výkonové parametry při nízkých teplotách ($-20\text{ }^\circ\text{C}$), nutnost použití ochranných obvodů, stárnutí, problémy s transportem, hluboké vybíjení [23]. Parametry použitého typu akumulátoru jsou uvedeny níže:

Tab. 1 Přehled parametrů LiFePO_4 článků ZG-LF020A [22]

Parametr	Hodnota
Jmenovité napětí	3,2 V
Jmenovitá kapacita	20 Ah
Maximální napětí	3,8 V
Minimální napětí	2,6 V
Provozní napětí	2,8 až 3,7 V
Maximální vybíjecí proud	60 A
Maximální nabíjecí proud	20 A
Vnitřní odpor	<2 m Ω
Počet cyklů při 80 % DoD a 20 °C	>2000
Rozsah provozních teplot – nabíjení/vybíjení	0 °C až 45 °C / -25 °C až 55 °C
Rozměry (w × h × l)	71 mm × 178 mm × 28 mm
Hmotnost	0,65 kg

Modulární řešení domácí bateriové stanice řady EnergyCloud HOME, která byla blíže

popsána v kapitole 1.3.3, využívá pro škálování svého úložiště energie moduly o velikosti cca 7,68 kWh (Obr. 23). Uvedená kapacita vyplývá z akumulátorové sestavy tvořené 120 kusy článků ZG-LF020A a řídí se pak tedy níže uvedenou rovnicí:

$$E_{\text{modul}} = n_{\text{článek}} \times U_{\text{jmen}} \times Q_{\text{jmen}} = 120 \times 3,2 \times 20 = 7,68 \text{ kWh} \quad (4.1)$$

Ve výše uvedené rovnici 4.1 označuje E_{modul} maximální množství uložené energie (tedy kapacita úložiště), $n_{\text{článek}}$ je počet článků v sestavě, U_{jmen} vyjadřuje jmenovité napětí článku a Q_{jmen} značí jmenovitou kapacitu.



Obr. 23 7,6 kWh modul pro rozšíření úložiště domácí bateriové stanice řady EnergyCloud HOME [4]

4.2 Analýza spotřeby energie

Důležitým faktorem při určování výkonu aktivního balancéru je krom znalosti rozptylu parametrů jednotlivých článků v akumulátorové sestavě také znalost odběrové charakteristiky typické domácnosti, ve které bude bateriová stanice nainstalována a z toho plynoucích požadavků na dimenzování systému. Mezi spotřebiče, které nejvýrazněji ovlivňují odběr elektrické energie domácnosti, patří především volba systému vytápění, klimatizace, ohřev vody anebo například i nabíjecí stanice pro elektromobil. Zákazníci s vysokou spotřebou energie však mohou správně dimenzovat kapacitu svého bateriového úložiště s využitím několika modulů tvořící rozsáhlý bateriový komplex. Samotné bateriové úložiště lze nabíjet čistě z distribuční soustavy během nízkého tarifu (tzn. ekonomicky výhodnější), nicméně většina instalovaných úložišť je kombinována se zdroji obnovitelné energie ve formě fotovoltaické elektrárny. Alternativě lze využít také větrné, vodní či geotermální energie.

Při součtu současných odběrů spotřebičů v typické domácnosti se dostáváme na okamžitý odběr o hodnotě necelých 11 kW. Jedná se ovšem o krajně nepříznivý stav a některé z těchto

přístrojů jsou reálně požívané jen několik minut denně. Je pravděpodobné, že „špičkový“ odběr v domácnosti bude dosahovat krátkodobě hodnoty maximálně 5 kW [24], [25].

Uvedený odhad však nezahrnuje vytápění a ohřev vody pomocí elektrické energie. Výkony topných zařízení jsou značně závislé na požadavcích odběratelů. Elektrické ohřívače teplé užitkové vody mají obvykle příkon v řádu jednotek kW. Pro případy, kdy je spotřeba objektu nutně vysoká, nabízí společnost EnergyCloud řešení v podobě 3f varianty s výkonem 10,8 kW dlouhodobě (či 15,4 kW po dobu maximálně 15 minut) [4].

4.3 Požadované parametry a funkce

Pro výpočet výkonu balancéru bude uvažován případ, kdy je úložiště o kapacitě 7,68 kWh kontinuálně vybíjeno výkonem 3,6 kW, což odpovídá jmenovitému kontinuálnímu výkonu střídače v domácí bateriové stanici EnergyCloud HOME 1f. Tento výkon by podle průzkumu měl pro běžnou domácnost bez vytápění využívající elektřinu dostačovat. Pro dobu vybíjení pak platí následující rovnice:

$$t_{\text{vyb}} = \frac{E_{\text{modul}} \times DoD_{\text{max}}}{P_{\text{max}}} = \frac{7,68 \times 0,8}{3,6} = 1,7 \text{ h} \quad (4.2)$$

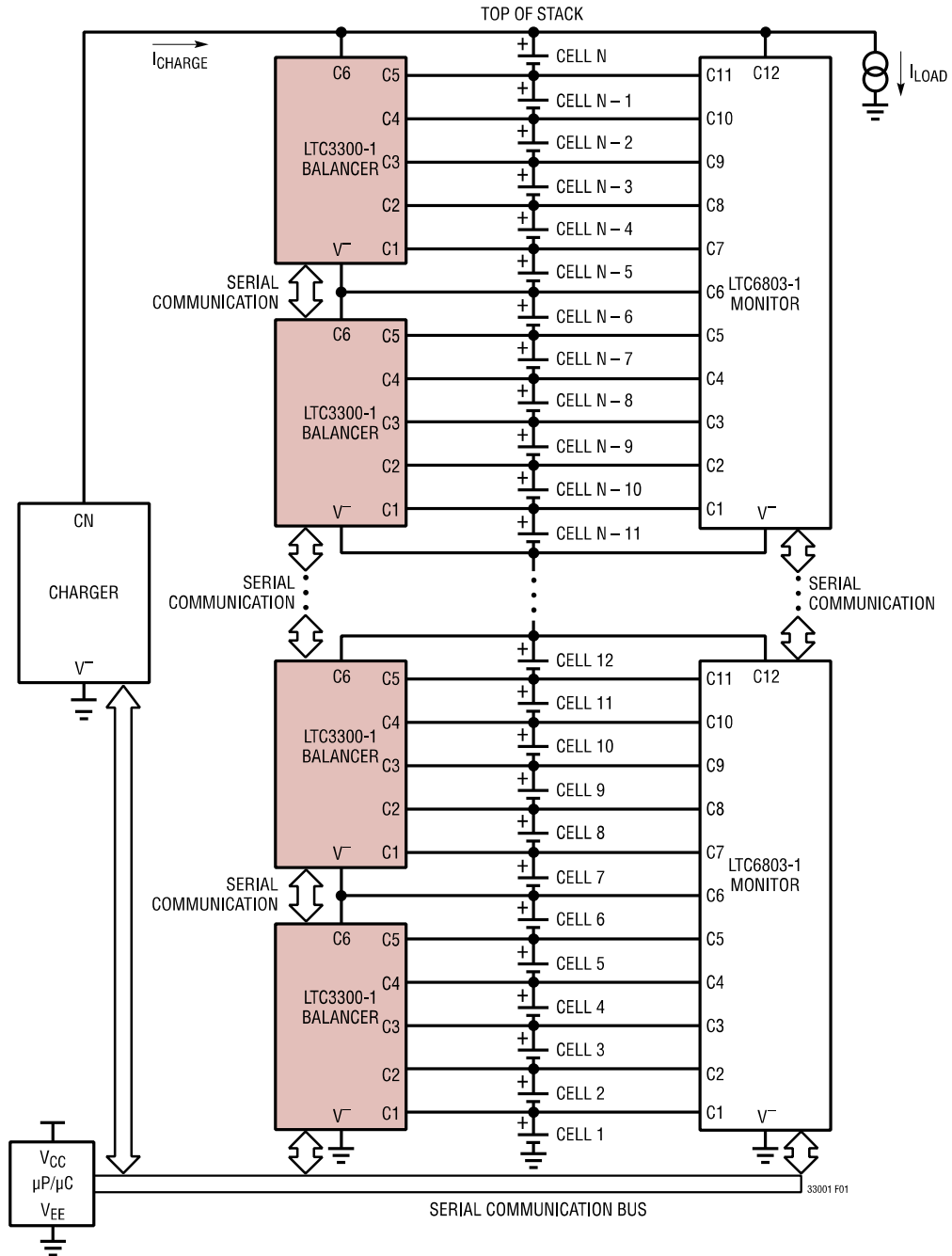
V rovnici 4.2 značí t_{vyb} dobu vybíjení akumulátorů, DoD_{max} pak označuje povolenou hloubku vybití a P_{max} je maximální výkon zařízení. Při jmenovitém výkonu tedy dojde k vybití plně nabitého úložiště za 1,7 hodiny. Při předpokladu, že se rozptyl parametrů článků použitých v akumulátorové sestavě vejde do intervalu 2 %, bude platit tato rovnice:

$$I_{\text{bal}} = \frac{\Delta Q_{2\%}}{t_{\text{vyb}}} = \frac{0,4}{1,7} = 0,235 \text{ A} \quad (4.3)$$

Z rovnice 4.3 pak pro 2% rozptyl kapacity akumulátoru $\Delta Q_{2\%}$ vyplývá potřebná hodnota proudu pro balancování I_{bal} jako 0,235 A. Tento parametr je tedy směrodatným při návrhu obvodového řešení aktivního balancéru.

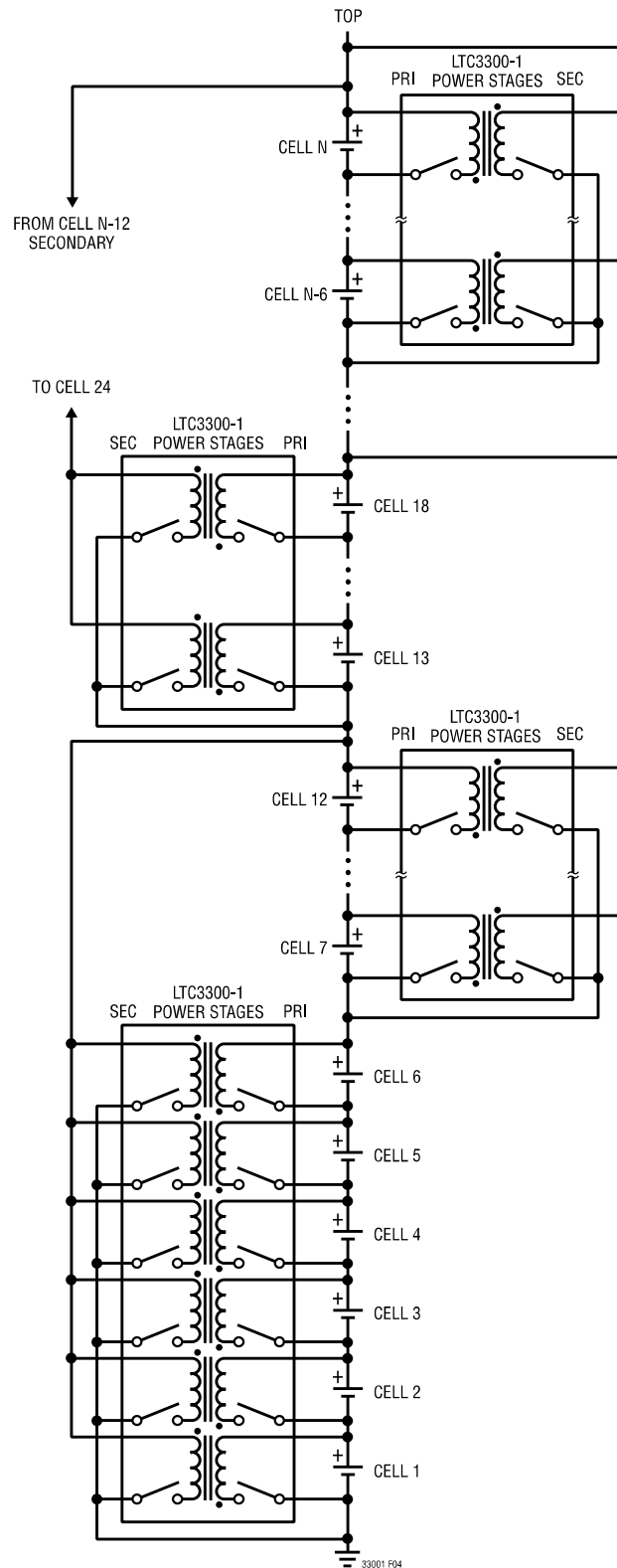
4.4 Architektura zařízení

Z důvodu jednoduchosti zapojení a vhodné topologie pro použití v domácí bateriové stanici řady EnergyCloud HOME bylo vybráno řešení společnosti Analog Devices. Vzhledem ke 120 článkům v akumulátorové sestavě rozdělených do modulů po 12 vychází na každý z těchto modulů 2 obvody pro řízení balancérů LTC3300-1 a jeden monitorovací a ochranný obvod LTC6803-1 [20], [21]. Propojení komunikačních sběrnic zmiňovaných IO do daisy-chainu při spojování modulů do akumulátorové sestavy je uvedeno na *Obr. 24* společně s MCU použitím pro řízení pomocí SPI sběrnice.



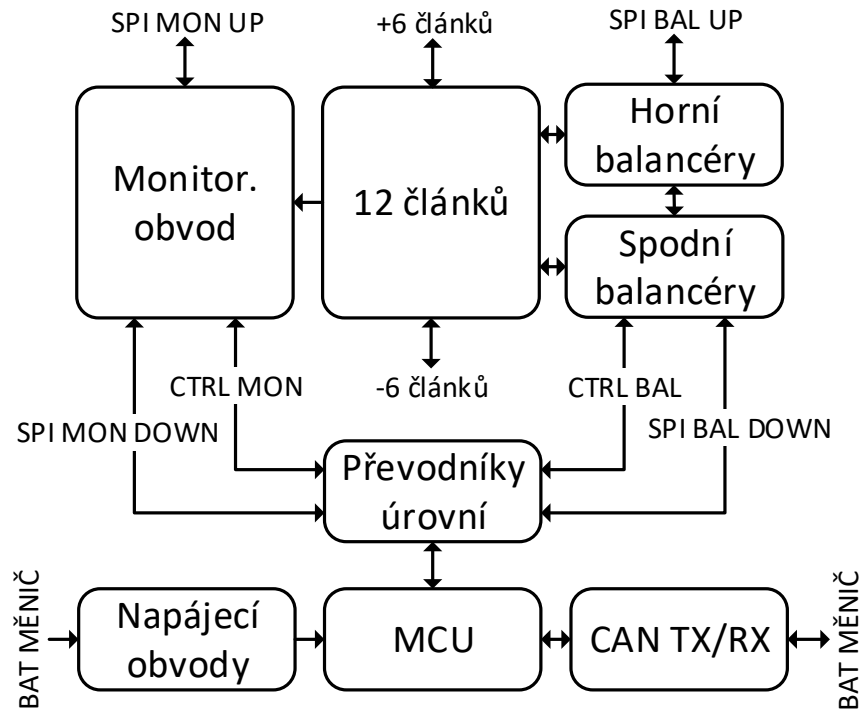
Obr. 24 Obvody LTC3300-1 a LTC6803-1 použité pro aktivní BMS [20]

Pro konstrukci rozsáhlejších akumulátorových sestav je z důvodu omezení jednoho obvodu při řízení balancérů na 6 článků nezbytně nutné tyto šestice vzájemně propojit tak, aby postupně došlo k vyvážení celé sestavy. V opačném případě by byly vždy články v dané šestici vyváženy, nicméně tato šestice by fakticky představovala z pohledu sestavy jeden článek. Akumulátorová sestava by pak tedy byla rozdělena na 10 sériově řazených modulů, které by nebyly vzájemně vyvažovány. Způsob zapojení pro vyvážení sestavy je pak uveden na Obr. 25 či případně na Obr. 21 v kapitole 2.3.2.3.2.



Obr. 25 Princip balancování akumulátorových sestav větších rozsahů s obvody LTC3300-1 [20]

Z nákresu principu zapojení pro vyvažování rozsáhlých akumulátorů plynou dvě jednoduchá pravidla nezbytná při implementaci: Při přechodu z nižšího do vyššího potenciálu je kladná větev sekundární sběrnice zapojena o šest článků výše. Je-li daná šestice v sestavě nejvýše, je kladný výstup její sekundární sběrnice připojen na nejvyšší potenciál sestavy.



Obr. 26 Architektura navrženého BMS

Celková architektura navrženého BMS pro jeden akumulátorový modul je vyobrazena na Obr. 26. Všech 12 sériově zapojených 20 Ah LiFePO₄ článků je monitorováno obvodem LTC6803-1, který umožňuje kromě přesného měření napětí (maximálně 0,25 % z měřené hodnoty) také pasivní balancování pomocí odporů, měření teploty čipu i okolí pomocí dvou externích negative temperature coefficient (NTC) termistorů [21]. Horní a spodní balancéry (vždy po 6 článcích) využívají pro své řízení obvody LTC3300-1 a jimi ovládané obousměrné flyback měniče mohou přenášet energii mezi vybraným článkem a společnou sběrnicí pro danou šestici [20]. Počet ani směr současně balancujících měničů v dané šestici (či celé sestavě) není nijak omezen a vede tedy potenciálně k velmi rychlému vybalancování rozdílů (proud na článek až 0,5 A). Obvod umožňuje také detekci přepětí na sběrnicí či jednotlivých článcích, signalizaci stavu jednotlivých budičů tranzistorů ve flyback měničích a teplotu čipu. Pro propojení s dalšími šesticemi výše a níže v sestavě mají moduly vyvedeny také kladné póly paralelizovaných sekundárních vinutí flyback měničů. Oba typy integrovaných obvodů implementují zabezpečení přenosu dat pomocí cyclic redundancy check (CRC) při příjmu i vysílání. Pro detekci výpadku komunikace (například chyba na straně řídicího MCU) slouží (jak v případě monitorovacího obvodu, tak v případě balancéru) watchdog časovače s periodou cca 1 až 2 s. Pro balancování je tedy nutné do IO periodicky posílat příkazy, které časovač resetují.

Komunikaci s IO určenými pro monitorování a řízení aktivního balancování článků napříč akumulátorovou sestavou zajišťuje jeden MCU pomocí SPI sběrnice. Chip select signály pro monitorovací obvod a balancér nacházející se na nejnižším potenciálu akumulátorové sestavy pak rozhodují o tom, se kterým ze jmenovaných obvodů bude komunikace právě probíhat. Pro zajištění kompatibilních napěťových úrovní SPI signálů mezi IO BMS a řídicím MCU jsou použity neizolované převodníky úrovní. Signálové skupiny CTRL MON a CTRL BAL slouží ke konfiguraci IO umístěných nejnižše v sestavě tak, aby byly nastaveny do režimu BOTTOM OF THE STACK.

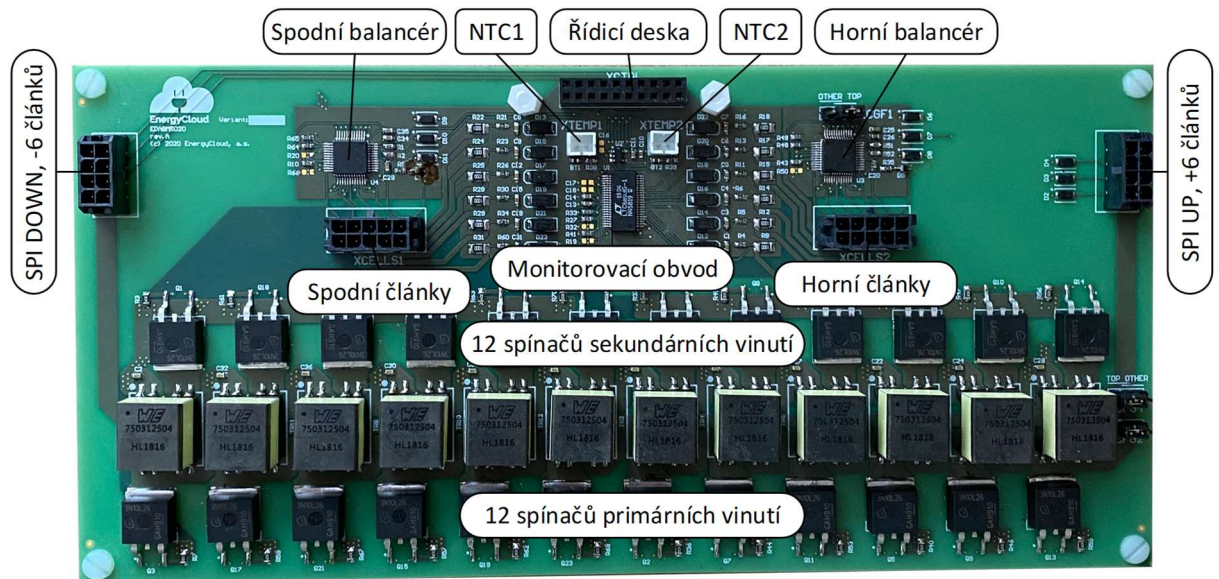
Pro řízení akumulátorové sestavy byl využit MCU STM32G431KB, který pomocí Controller Area Network (CAN) rozhraní komunikuje s nadřazeným MCU nacházejícím se na řídicí desce bateriového měniče. Tento měnič poskytuje také napájení pro MCU a přidružené řídicí obvody.

Kompletní schéma zapojení aktivního BMS se nachází v přílohách A až H.

5 Praktická realizace

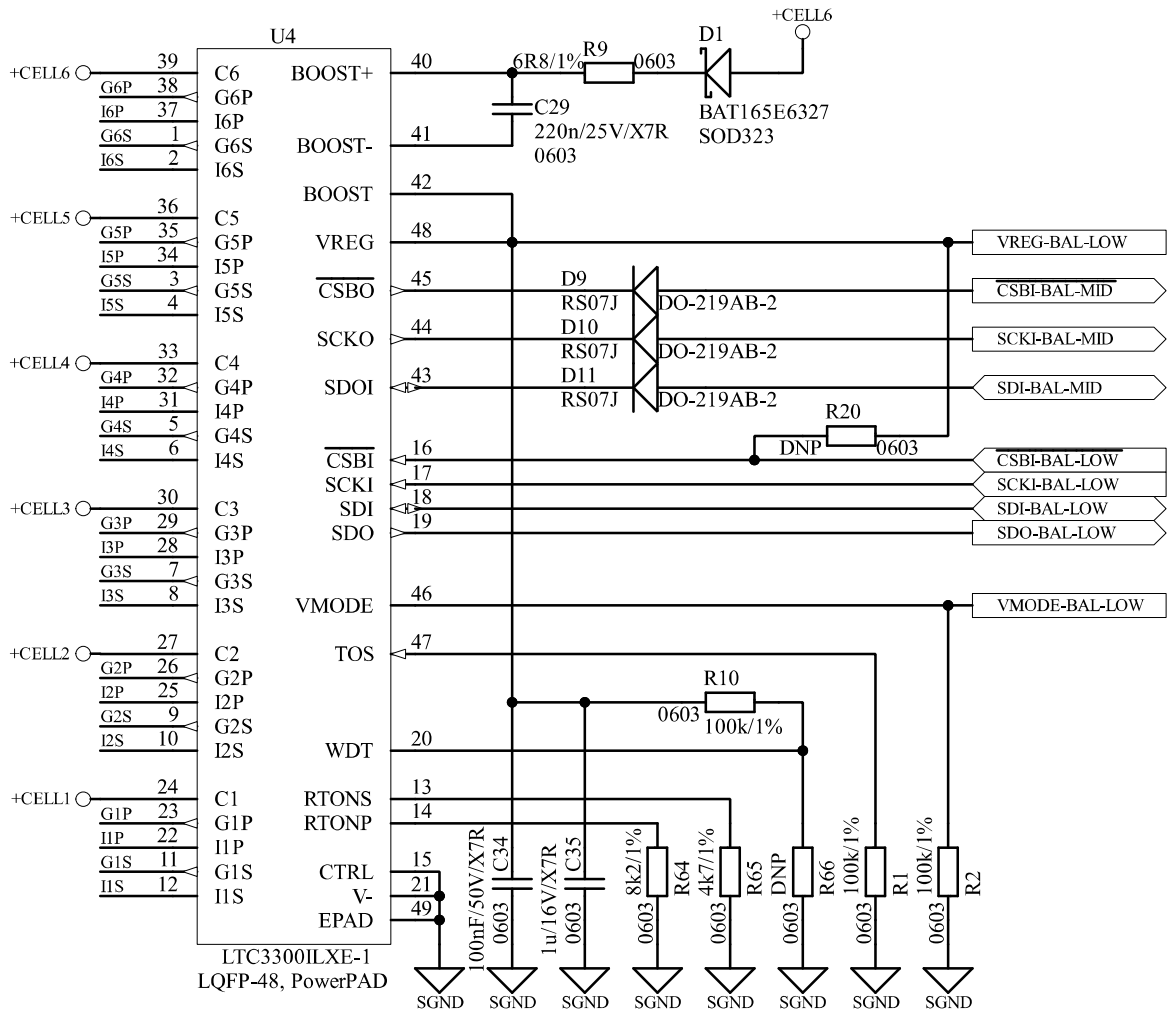
Obvodové řešení bylo rozděleno na dvě desky plošných spojů (DPS) a to na řídicí a výkonovou. K tomuto rozhodnutí vedl fakt, že MCU, CAN rozhraní, pomocné napájecí obvody ani převodníky úrovní není třeba implementovat v každém akumulátorovém modulu, ale stačí je připojit až k nejspodnějšímu modulu v sestavě. Návrh schématu a DPS proběhl v programu Altium Designer 19 [27]. Samotný plošných spoj je 1,5 mm silný, čtyřvrstvý a s plátováním 18/35 μm pro vnější vrstvy/jádro.

5.1 Výkonová deska



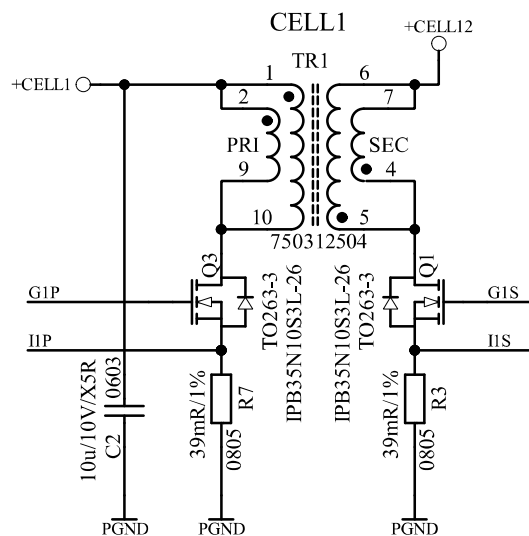
Obr. 27 Výkonová deska BMS

Fotka výkonové DPS na Obr. 27 zobrazuje spodní a horní obvody pro řízení balancérů společně s dvěma konektory pro připojení dvou šestic článků. Ke všem 12 článkům je pak připojen monitorovací obvod dovybavený o rezistory pro pasivní balancování. Externí NTC termistory se k monitorovacímu obvodu připojují přes konektory značené jako NTC1 a NTC2. Konektor uprostřed horní části desky pak připojuje řídicí DPS. Propojení s dalšími moduly v sestavě umožňují pak SPI DOWN a SPI UP konektory na bočních hranách desky. V těchto konektorech jsou také vyvedeny výkonové spoje pro propojování jednotlivých šestic. Pro obousměrný přenos energie mezi články a sběrnici je určeno 12 spínacích tranzistorů pro primární a taktéž 12 tranzistorů pro sekundární vinutí.



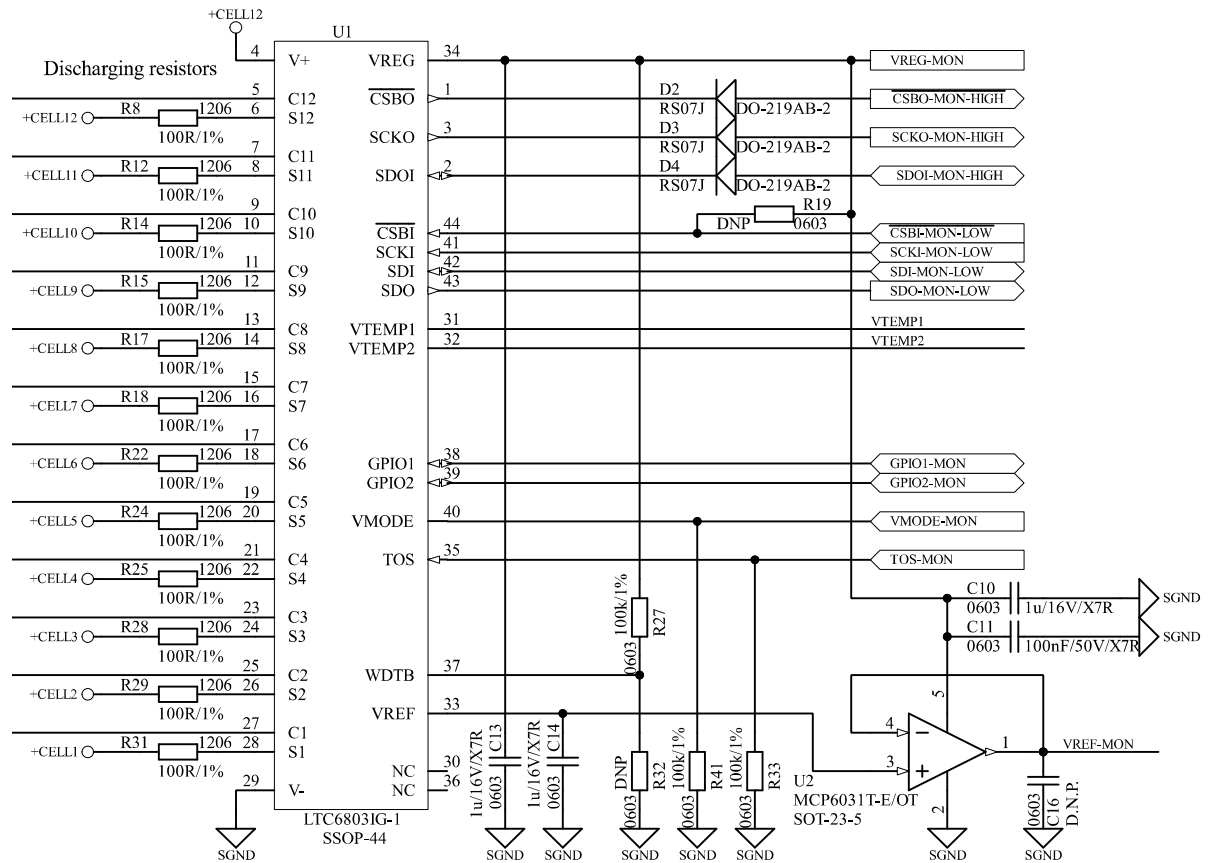
Obr. 28 Zapojení obvodu LTC3300-1 pro řízení balancování

Zapojení balancéru je zobrazeno na Obr. 28. Na levé straně integrovaného obvodu se nacházejí piny pro připojení k jednotlivým akumulátorům. Signály Cx zajišťují napájení budičů tranzistorů pro flyback měniče, přičemž tyto MOSFETy budí piny GxS (sekundární – sběrnice) a GxP (primární – článek). Napěťové úbytky vznikající na shuntech zapojených do source spínacích tranzistorů (Obr. 29) jsou přivedeny na piny IxP/IxS a uvnitř IO komparovány s referenční úrovní (50 mV). Tato komparace signalizuje dosažení definované špičkové hodnoty proudu v primárním či sekundárním vinutí a je tedy pokynem pro rozeptnutí spínacího prvku. V realizovaném zařízení jsou tyto špičkové proudy shodné pro obě vinutí a to 1,28 A. V pravé části se nachází daisy-chain komunikace (UP a DOWN směr), přičemž DOWN směr může být v případě, že je nejbližší modul v akumulátorové sestavě připojen k řídicímu MCU, použit jako klasické SPI rozhraní. Součástky připojené k BOOST pinům spoluutvářejí bootstrap obvod nezbytný pro napájení budiče pro spínání nejvyššího článku v dané šestici. Signál VMODE přepíná SPI rozhraní pro použití s MCU či pro daisy-chain. TOS (Top Of Stack) určuje pozici balancéru v akumulátorové sestavě. WDT výstup watchdog časovače signalizuje, zda byl v definovaném časovém intervalu (cca poslední 1 s) přijat platný příkaz z MCU. Odpory připojené do RTONS a RTONP určují, jak mají být dlouhé intervaly pro sepnutí tranzistorů v primárním či sekundárním obvodu flyback měniče v případě, že není detekována špičková hodnota proudu vlivem vyzkratovaného shuntu. CTRL pin definuje, zda je obvod použit pro balancování s jedním transformátorem (primární vinutí pro každý článek, jedno sekundární) nebo více transformátory (pro každý článek jeden, sekundární vinutí spojená paralelně). VREG je výstup lineárního regulátoru použitého pro napájení vnitřních řídicích obvodů.



Obr. 29 Obousměrný flyback měnič pro aktivní balancování

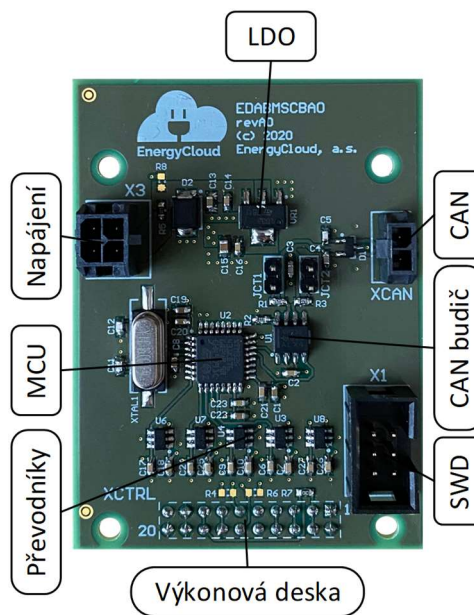
Obousměrný měnič na Obr. 29 používá flyback transformátor s převodem 1:1, indukčností 3,46 μH a saturačním proudem 10,2 A. Spínací frekvence pro primární i sekundární stranu byly se znalostí parametrů transformátoru, a pro jmenovité napětí článků 3,2 V, vypočteny jako 669 kHz. Použitý transformátor 750312504 je doporučený výrobcem IO balancéru stejně tak jako MOSFET tranzistory IPB35N10S3L [28], [29].



Obr. 30 Zapojení monitorovacího obvodu LTC6803-1

Levá strana monitorovacího obvodu LTC6803-1 uvedeného na Obr. 30 pomocí signálů C_x a RC filtrů (příloha B) provádí měření napětí na jednotlivých článcích. 100 Ω odpory mohou být použity pro pasivní balancování (respektive vybíjení) článků. Pravá část IO má podobné zapojení jako LTC3300-1 a proto budou dále popsány jen piny s odlišnou funkcí. VTEMP1/2 umožňují připojení odporových děličů s NTC termistory pro měření teploty uvnitř modulu. GPIO1/2 jsou pro diagnostické účely zavedeny do MCU. Signál VREF je přes buffer použit pro napájení odporových děličů s NTC termistory.

5.2 Řídicí deska

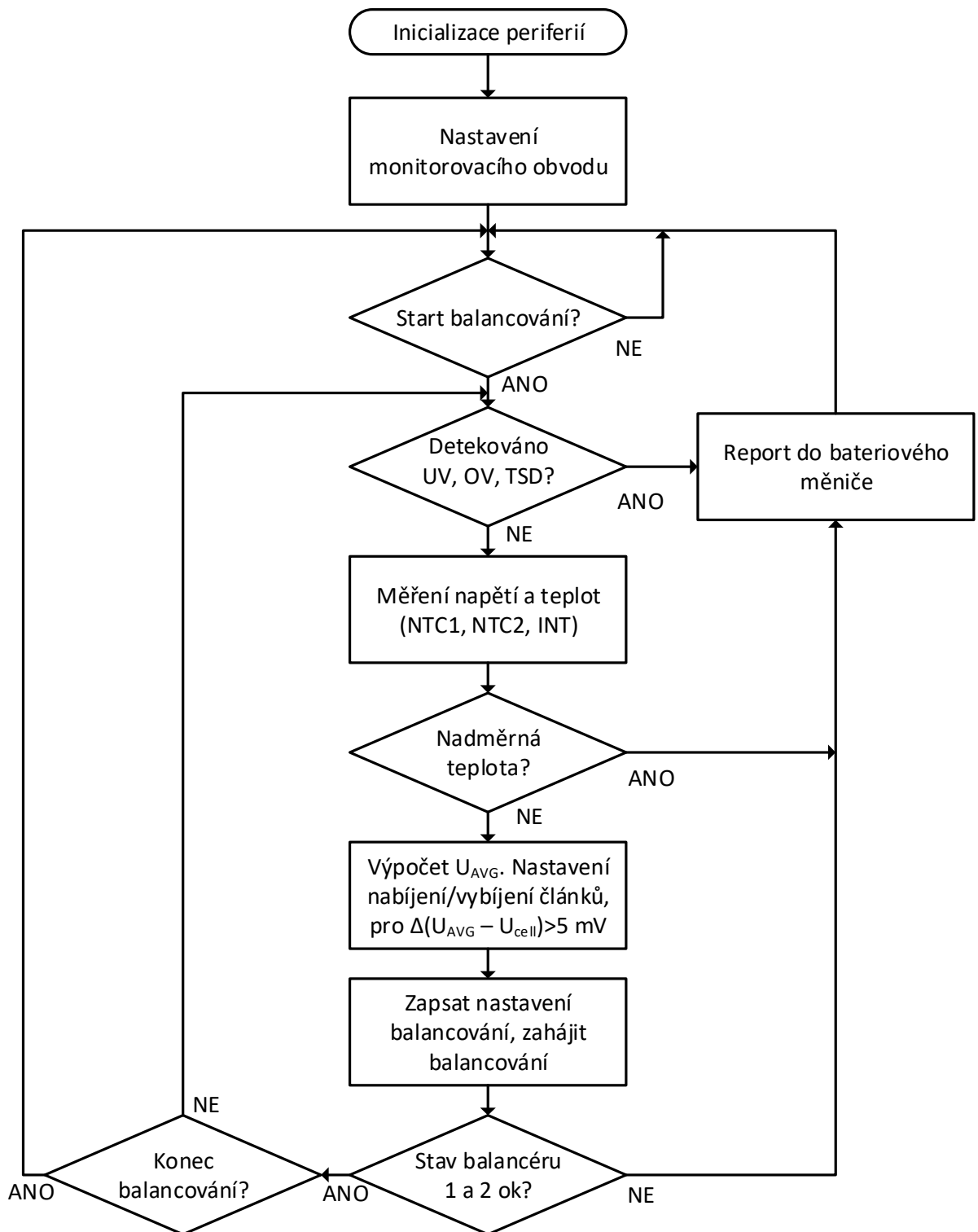


Obr. 31 Řídicí deska BMS

Na řídicí DPS zachycené na Obr. 31 se nachází následující bloky:

- MCU dedikované pro řízení obvodů pro monitorování a balancování a také CAN komunikaci s nadřazenou jednotkou v bateriovém měniči
- 16 MHz krystal pro stabilní hodinový signál
- CAN budič SN65HVD230D společně s ochrannými obvody a terminací [28]
- Převodníky signálových úrovní mezi výkonovou a řídicí deskou
- Serial Wire Debug (SWD) rozhraní pro programování a debugování
- Low-dropout (LDO) regulátor pro napájení MCU, CAN budiče a převodníků
- Konektor pro napájení řídicí desky z bateriového měniče

6 Firmware



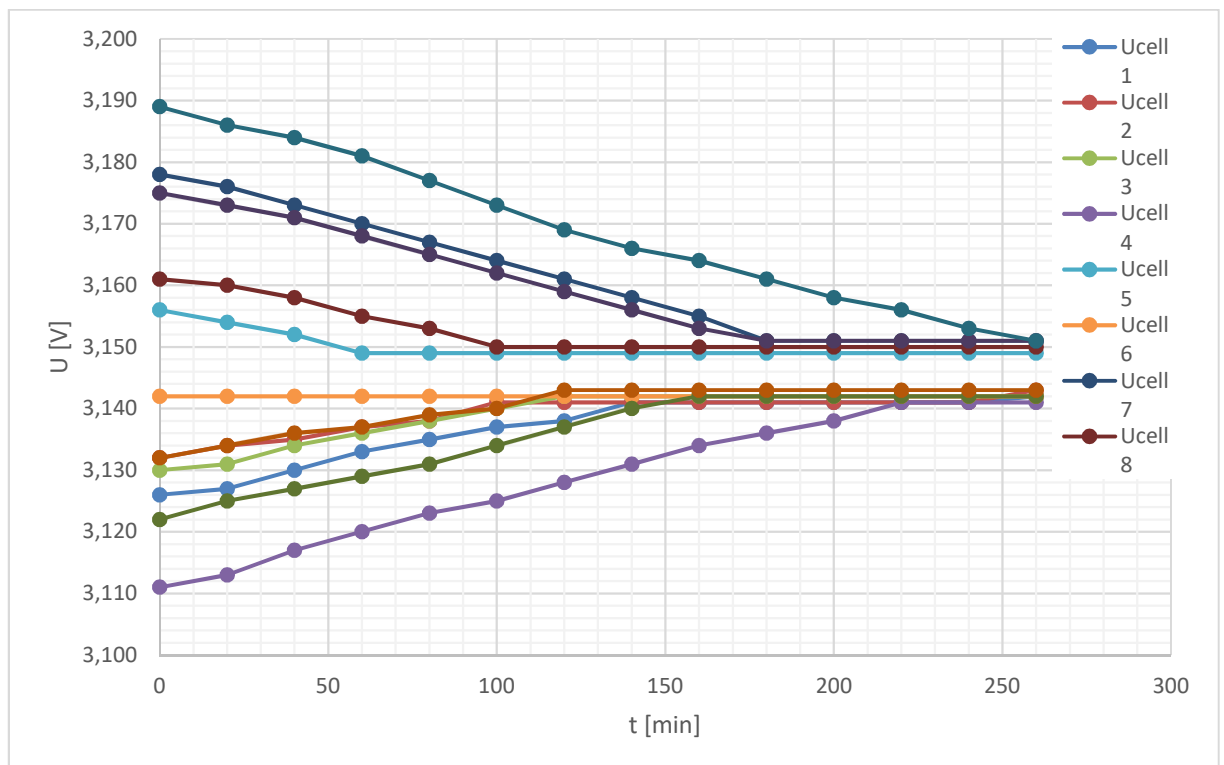
Obr. 32 Vývojový diagram firmware v řídicím MCU

Vývojový diagram na *Obr. 32* popisuje hlavní programovou smyčku implementovanou v MCU na řídicí desce. Po inicializaci nezbytných periférií (SPI, CAN) přechází program do bloku nastavení monitorovacího obvodu, ve kterém postupně dojde k definici úrovní pro podpětí a přepětí jednotlivých článků a také periody pro čtení komparátorů porovnávajících aktuální hodnotu napětí článku právě s těmito definovanými úrovněmi. Následně programová smyčka čeká na příjem příkazu od bateriovému měniči přes CAN. Je-li obdrženo pokyn ke startu balancování, dotáže se MCU monitorovacího obvodu, zda bylo detekováno podpětí (UV – undervoltage), přepětí (OV – overvoltage) nebo thermal shutdown (TSD), při kterém by došlo k vypnutí monitorovacího obvodu kvůli přehřátí. V případě, že je některá z chyb detekována, dojde k jejímu reportu bateriového měniče opět pomocí CAN sběrnice. Pokud chyba nenastala, započne měření napětí všech dvanácti článků a také teploty z externích termistorů NTC1/2 a čidla integrovaného v IO samotném. Při překročení prahových úrovní hodnot dojde opět k reportu chybové hlášky do bateriové měniče. V opačném případě je zahájen jednoduchý algoritmus použitý pro stanovení článků, které mají být v sestavě nabíjeny či vybíjeny. V prvním kroku je vypočten aritmetický průměr z hodnot napětí všechny dvanácti článků. Napětí jednotlivých článků je vůči tomuto průměru následně porovnáno. V případě, že je napěťová diference větší než 5 mV, bude daný článek vybíjen. Pro napěťovou diferenci menší než -5 mV je článek určen pro nabíjení. Vypočtená nastavení pro jednotlivé články jsou následně zapsána do obou obvodů pro řízení aktivního balancování. V průběhu balancování jsou oba tyto IO dotazovány na výskyt chyb (nadměrná teplota čipu, přepětí na společné sběrnici, chyba kteréhokoliv z budičů externích tranzistorů pro řízení flyback měničů) a tento případně odešlou po CANu do bateriového měniče. V případě, že MCU neobdrží příkaz pro ukončení balancování, začíná celá smyčka nanovo od detekce UV, OV a TSD.

7 Měření a testování funkcí

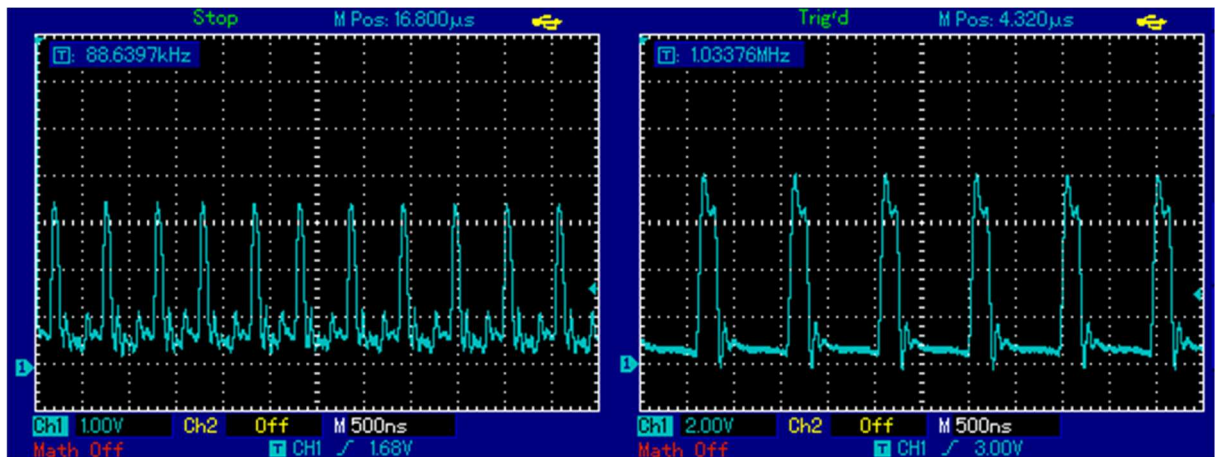
Během testovací fáze byly úspěšně ověřeny níže uvedené funkce obvodů aktivního BMS:

- Firmware implementovaný v MCU
- CAN komunikace mezi MCU na řídicí desce a MCU bateriového měniče
- SPI komunikace mezi MCU na řídicí desce a obvody pro balancování a monitorování včetně ověření funkce daisy-chainu pro dva balanční IO
- Nabíjení a vybíjení jednotlivých článků (oscilogramy na *Obr. 34*)
- Schopnost celého systému vybalancovat články v konečném čase s definovanou přesností (záznam z měření na *Obr. 33*)



Obr. 33 Průběh napětí jednotlivých článků v čase pro jeden modul (12 článků) bez zátěže

Před začátkem balancování (tj. v čase 0) byly články záměrně rozváženy pomocí vybíjení výkonovým rezistorem. Takto rozvážené články byly po 20minutových intervalech sledovány monitorovacím obvodem, který měřil jejich napětí. Získané hodnoty byly reportovány do připojeného PC přes Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART) rozhraní, které bylo pro testovací účely připojeno k MCU na řídicí desce. I přes výraznější rozdíly v napětí nejvíce (3189 mV) a nejméně (3111 mV) nabitého článku došlo k vyvážení článků (v toleranci ± 5 mV) v nezátíženém modulu cca po 4 hodinách.



Obr. 34 Oscilogram zachycující nabíjení (vlevo) a vybíjení (vpravo) článku

Výše uvedené oscilogramy zachycují průběhy řídicích signálů pro řídicí elektrody MOSFET signálů ve flyback měniči článku 1 na sekundární (vlevo) a primární (vpravo) straně.

Závěr

Práce se ve své úvodní části zabývá popisem domácí bateriových stanic včetně rozboru jejich obecné architektury a několika příkladů výrobků dostupných na trhu. Následující kapitola vyjmenovává akumulátorové články používané v těchto zařízeních společně s jejich klíčovými parametry a vlastnostmi. Pro ukotvení konstruovaného zařízení do kontextu systému pro bateriový management je dedikována kapitola rozebírající typy BMS, způsoby vyvažování článků v akumulátorových sestavách, a nakonec také konkrétní příklady systémů využívajících aktivních balancéry. V následující kapitole jsou popsány základní třídy algoritmů používaných pro balancování akumulátorových sestav. Pro návrh a realizaci aktivního BMS bylo následně nutno definovat požadavky kladené systémem (domácí bateriovou stanicí společnosti EnergyCloud) na výkon balancérů. Tyto vstupní parametry vyplynuly z nezbytných výpočtů a kvalifikovaných odhadů založených na modelových spotřebách domácností. Výběrem vhodné topologie z řešení dostupných po provedené rešerši byl zvolen základ zařízení v podobě integrovaných obvodů pro balancování a monitorování článků. Tyto obvody bylo nezbytně nutné doplnit o další části (řízení, napájení, komunikace) zajišťující vysoký stupeň autonomie a možnost interakce s dalšími komponenty v domácí bateriové stanici. Kapitola zabývající se architekturou firmware vysvětluje jednoduchý algoritmus implementovaný pro ověření funkcí zařízení. Dosažené výsledky při měření parametrů a testování aktivního BMS jsou uvedeny v kapitole poslední.

U výsledného zařízení byly ověřeny funkce pro balancování a monitorování akumulátorové sestavy. Funkční vzorek dokáže také komunikovat s nadřazeným systémem bateriového měniče. Implementovaný algoritmus použitý pro ověření schopnosti balancování akumulátorové sestavy je sice funkční, nicméně pro reálné nasazení systému do domácí bateriové stanice je nutné tento algoritmus značně modifikovat a vylepšit s použitím metody prediktivního balancování uváděné v [8]. Z hlediska požadavků kladených na funkce a parametry HW řešení je zařízení plně vyhovující a pro nasazení v cílové aplikaci je nezbytné opravit pouze několik drobných chyb, které byly odhaleny v průběhu debugování a testování. Mezi tyto chyby a nedostatky patří například absence diagnostických LED na řídicí desce a UART rozhraní pro ladění, chybné propojení mezi SWD programovacím rozhraním a MCU a také příliš vysoké hodnoty pull-up rezistorů na SPI sběrnici využívající budičů typu otevřený kolektor. V další revizi (po zdokonalení algoritmu pro balancování článků) bude systém připraven pro nasazení v nové generaci bateriových stanic.

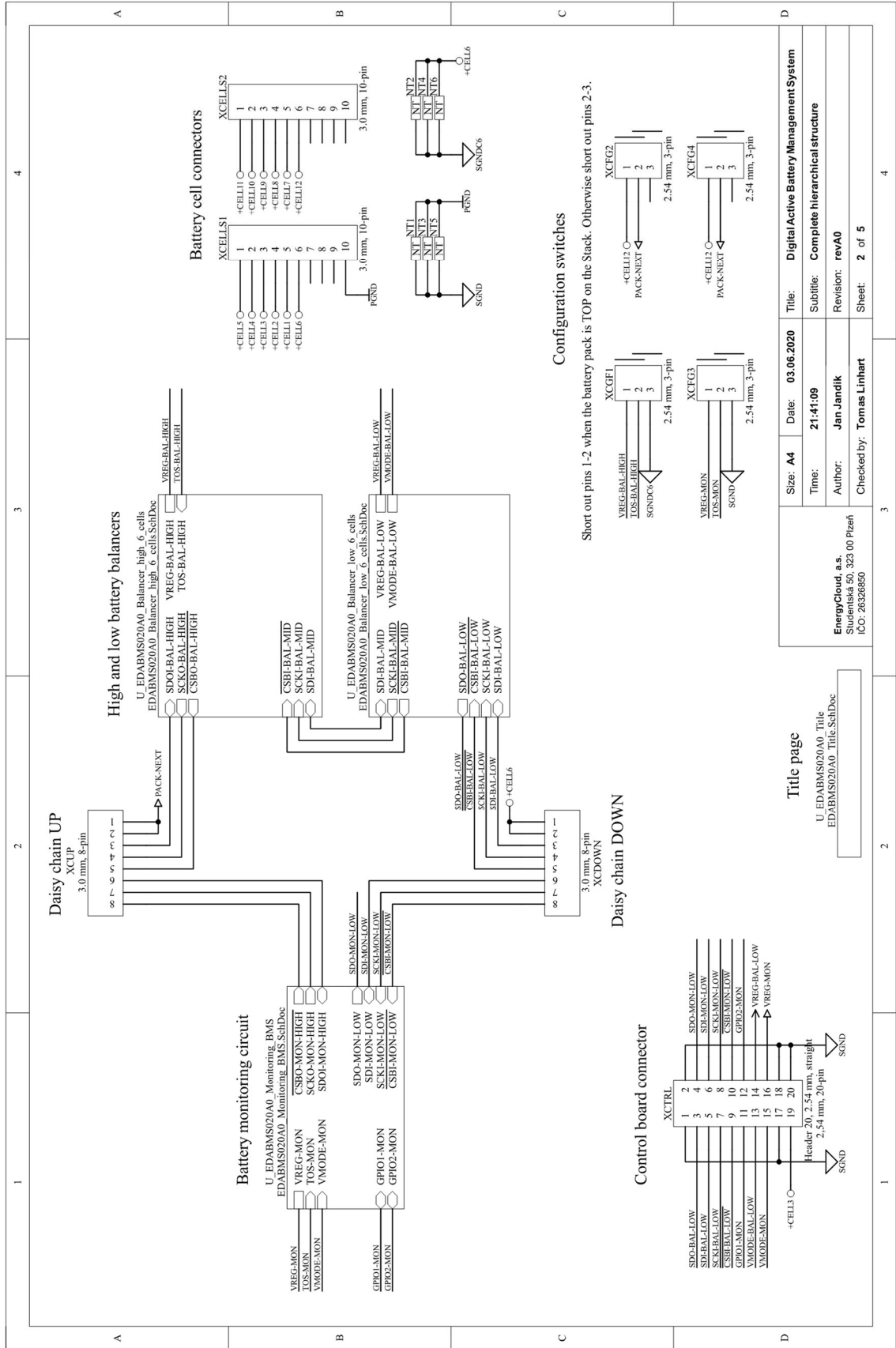
Použitá literatura

- [1] Alpha ESS SMILE5. *Alpha ESS*. [cit. 9. 3. 2020]. Dostupné z: https://www.alpha-ess.com/Upload/Images/20180820053710_954444.pdf
- [2] AIO Scalable Capacity 7.2 kWh & 10.8kWh. *Q CELLS*. [cit. 9. 3. 2020]. Dostupné z: <https://myess.hansoltechnics.com/prod/prod.do>
- [3] HOME BATTERY STORAGE SOLUTIONS. *SOLTARO*. [cit. 9. 3. 2020]. Dostupné z: <https://soltaro.com/soltaro-products-energy-saving-solutions/domestic-battery-storage-solutions>
- [4] Battery HOME 38. *EnergyCloud*. [cit. 9. 3. 2020]. Dostupné z: <http://www.energycloud.cz/>
- [5] How to choose the best battery for a solar energy system. *Energysage*. [cit. 15. 3. 2020]. Dostupné z: <https://www.energysage.com/solar/solar-energy-storage/what-are-the-best-batteries-for-solar-panels/>
- [6] DOSTÁL, Ondřej. *Bateriový management soustavy trakčních lithiových baterií*. Plzeň, 2016. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací
- [7] What Types of Batteries are Used in Solar Electric Systems?. *Northern Arizona Wind&Sun*. [cit. 15. 3. 2020]. Dostupné z: <https://www.solar-electric.com/learning-center/battery-types-for-solar-electric-systems.html/>
- [8] VALDA, Lukáš. *Metody a algoritmy vyvažování sériově řazených lithiových článků*. Plzeň, 2016. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací
- [9] SUN, Shun et al. Accelerated aging and degradation mechanism of LiFePO₄/graphite batteries cycled at high discharge rates. *RSC Advances*. Royal Society of CHEMISTRY. 2018.
- [10] CAMPESTRINI, Christian et al. Ageing of lithium-ion battery modules with dissipative balancing compared with single-cell ageing. *Journal of Energy Storage*. ScienceDirect. 2016, 142-152.
- [11] ZILBERMAN, I. et al. Cell-to-cell variation of calendar aging and reversible self-discharge in 18650 nickel-rich, silicon-graphite lithium-ion cells. *Journal of Energy Storage*. ScienceDirect. 2019.
- [12] ISL78600 datasheet. *Renesas*. [cit. 25. 3. 2020]. Dostupné z: <https://www.renesas.com/eu/en/doc/datasheet/isl78600.pdf>
- [13] SCOTT, Kevin et al. *Active Battery Cell Balancing*. Analog Devices. [cit. 27. 3. 2020]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/technical-articles/active-battery-cell-balancing.html>
- [14] PRESSMAN, Abraham. *Switching Power Supply Design*. 2. vyd. New York: McGraw-Hill, 1998. 678 s. ISBN 0-07-052236-7.
- [15] ISL78600 datasheet. *Renesas*. [cit. 25. 3. 2020]. Dostupné z: <https://www.renesas.com/eu/en/doc/datasheet/isl78600.pdf>

- [16] 16-Cell Li-Ion Battery Active Balance Reference Design. *Texas Instruments*. [cit. 2. 4. 2020]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/ug/tidubz7/tidubz7.pdf?ts=1591610658704&ref_url=https://www.ti.com/tool/TIDA-00817
- [17] EMB1428Q datasheet. *Texas Instruments*. [cit. 2. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/emb1428q.pdf?ts=1591605751137>
- [18] EMB1499Q datasheet. *Texas Instruments*. [cit. 2. 4. 2020]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/emb1499q.pdf?ts=1591606141621>
- [19] BQ76PL455 datasheet. *Texas Instruments*. [cit. 2. 4. 2020]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq76pl455a-q1.pdf?ts=1591610566196&ref>
- [20] LTC3300-1 datasheet. *Analog Devices*. [cit. 2. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC3300-1.pdf>
- [21] LTC6803-1 datasheet. *Analog Devices*. [cit. 2. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/680313fa.pdf>
- [22] ZG-LFP020AH datasheet. *GWL power*. [cit. 4. 4. 2020]. Dostupné z: https://files.ev-power.eu/inc/_doc/attach/StoItem/4011/Datasheet_ZG-LFP020AH.pdf
- [23] What are the advantages and disadvantages of LiFePO4 battery?. *KinStar – Innovative Power Solutions*. [cit. 5. 4. 2020]. Dostupné z: <http://www.kinstarbattery.com/Service/faq/18>
- [24] Jak odhadnout spotřebu elektřiny v domácnosti. *Dodavatelelektrinky.cz*. [cit. 5. 4. 2020]. Dostupné z: <https://dodavatelektriny.cz/uzitecne-informace/jak-odhadnout-spotrebu-elektriny>
- [25] Elektrická spotřeba domácích spotřebičů. *Dodavatelelektrinky.cz*. [cit. 5. 4. 2020]. Dostupné z: <https://dodavatelektriny.cz/uzitecne-informace/spotreba-domacich-spotrebicu>
- [26] STM32G431KB datasheet. *STmicroelectronics*. [cit. 6. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32g431kb.pdf>
- [27] Altium Designer. *Altium*. [cit. 6. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.altium.com/altium-designer/>
- [28] 750312504 datasheet. *Würth Elektronik*. [cit. 9. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.w-e-online.de/katalog/datasheet/750312504.pdf>
- [29] IPB35N10S3L datasheet. *Infineon*. [cit. 9. 4. 2020]. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPB35N10S3L_26-DS-v01_01-en.pdf?fileId=db3a304330046413013008a994583e77
- [30] SN65HVD230D datasheet. *Texas Instruments*. [cit. 9. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd230.pdf?ts=1591896650113>

Přílohy

Příloha A – Schéma výkonové desky – hierarchická struktura



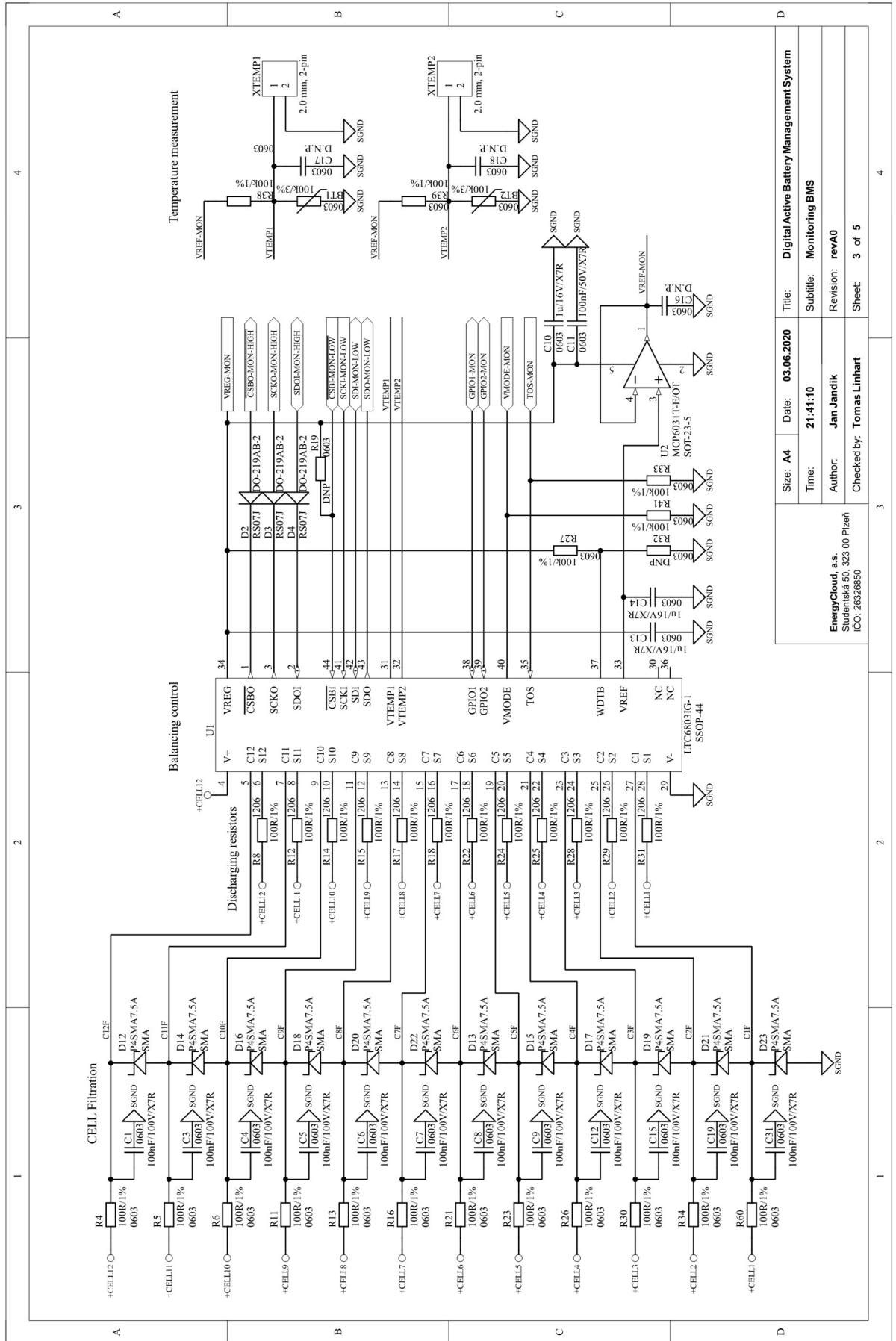
Title page

U_EDABMS020A0 Title
EDABMS020A0 Title.SchDoc

Size: A4	Date: 03.06.2020	Title: Digital Active Battery Management System
Time: 21:41:09	Author: Jan Jandík	Subtitle: Complete hierarchical structure
Checked by: Tomas Linhart	Revision: revA0	Sheet: 2 of 5

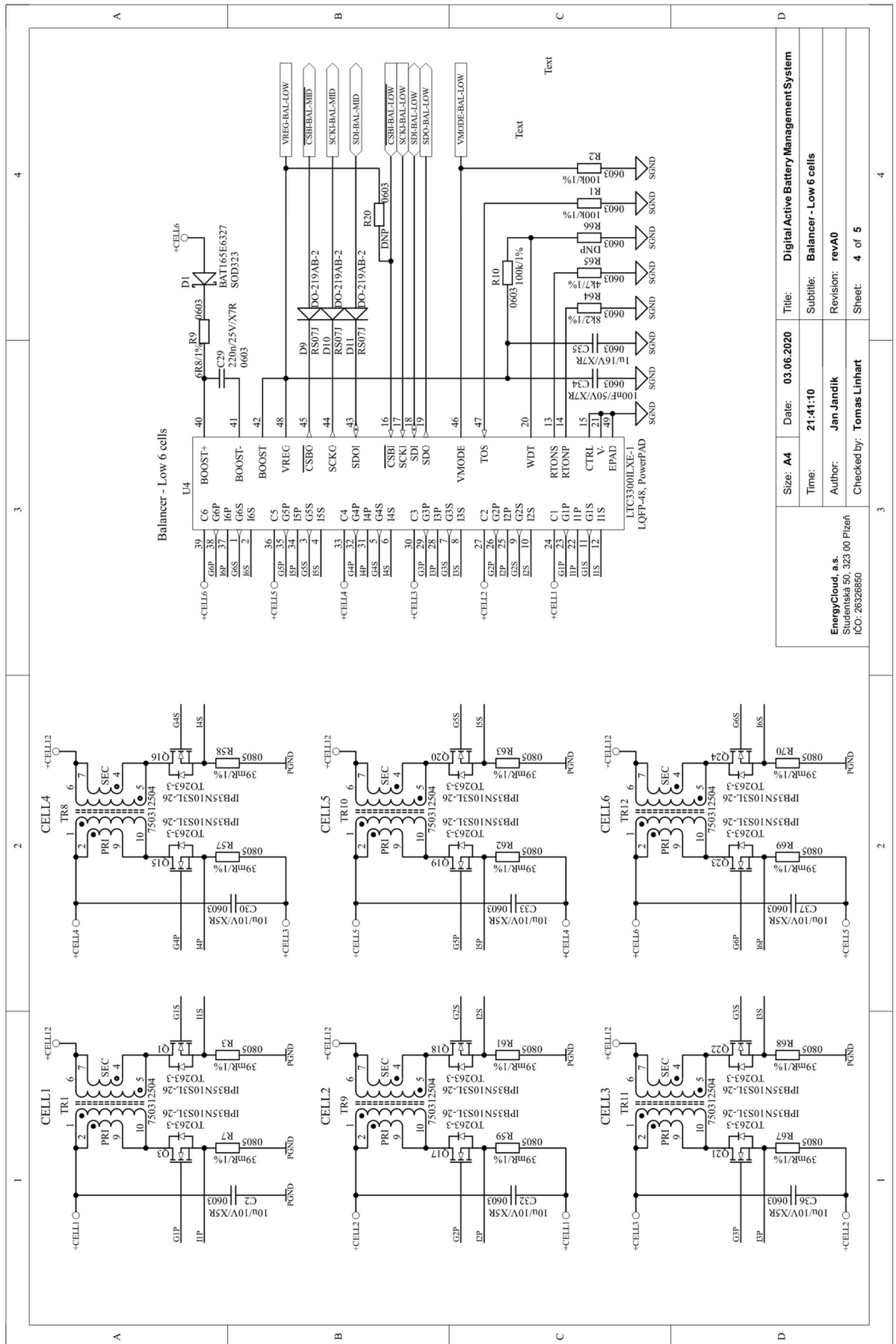
EnergyCloud, a.s.
Studentská 50, 323 00 Pízen
ICO: 26326950

Příloha B – Schéma výkonové desky – monitorovací obvod

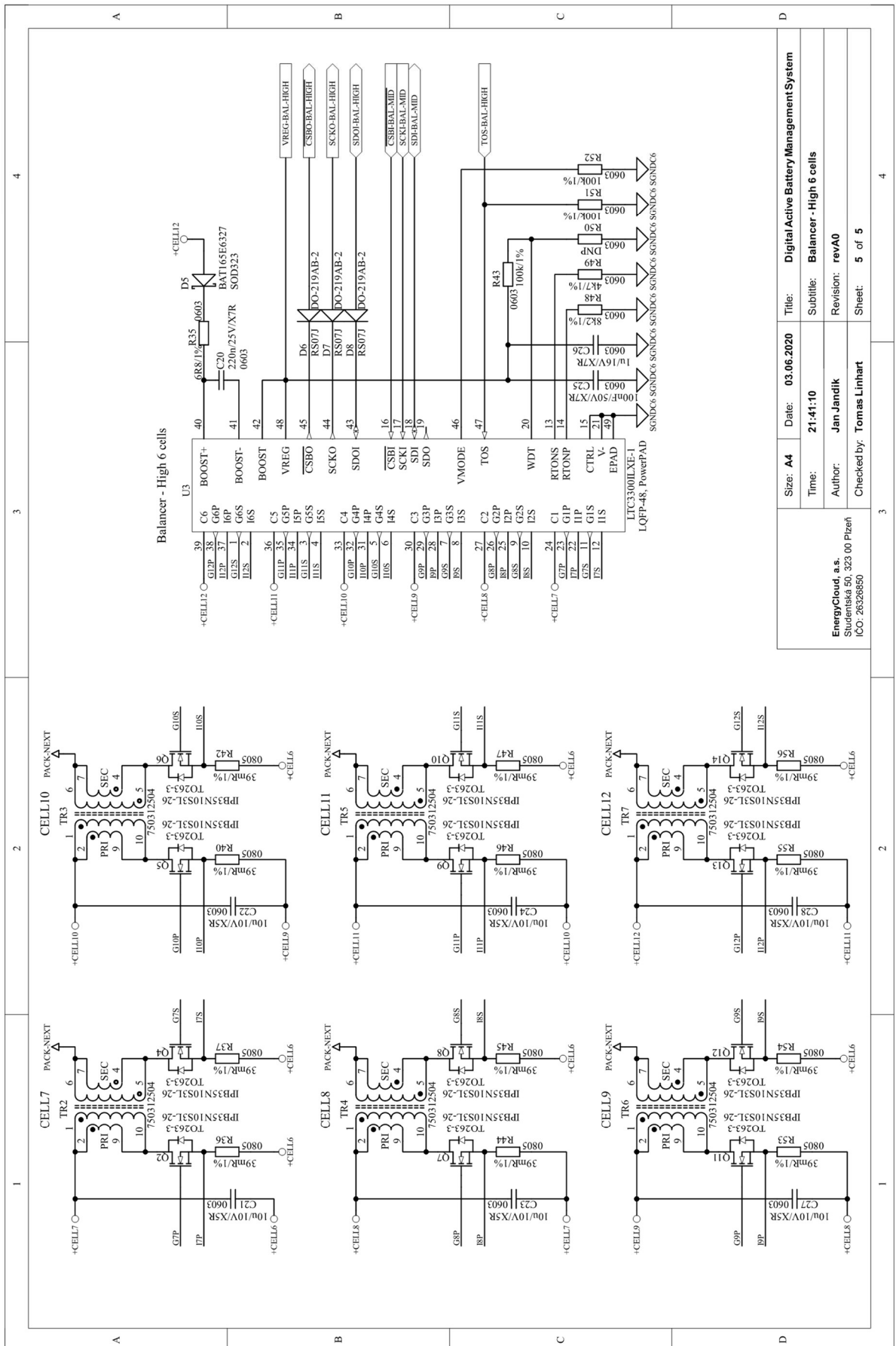


Size: A4	Date: 03.06.2020	Title: Digital Active Battery Management System
Time: 21:41:10	Author: Jan Jandík	Subtitle: Monitoring BMS
Checked by: Tomas Linhart	Revision: revA0	
EnergyCloud, a.s. Studenská 50, 323 00 Plzeň IČO: 26326850	Sheet: 3 of 5	

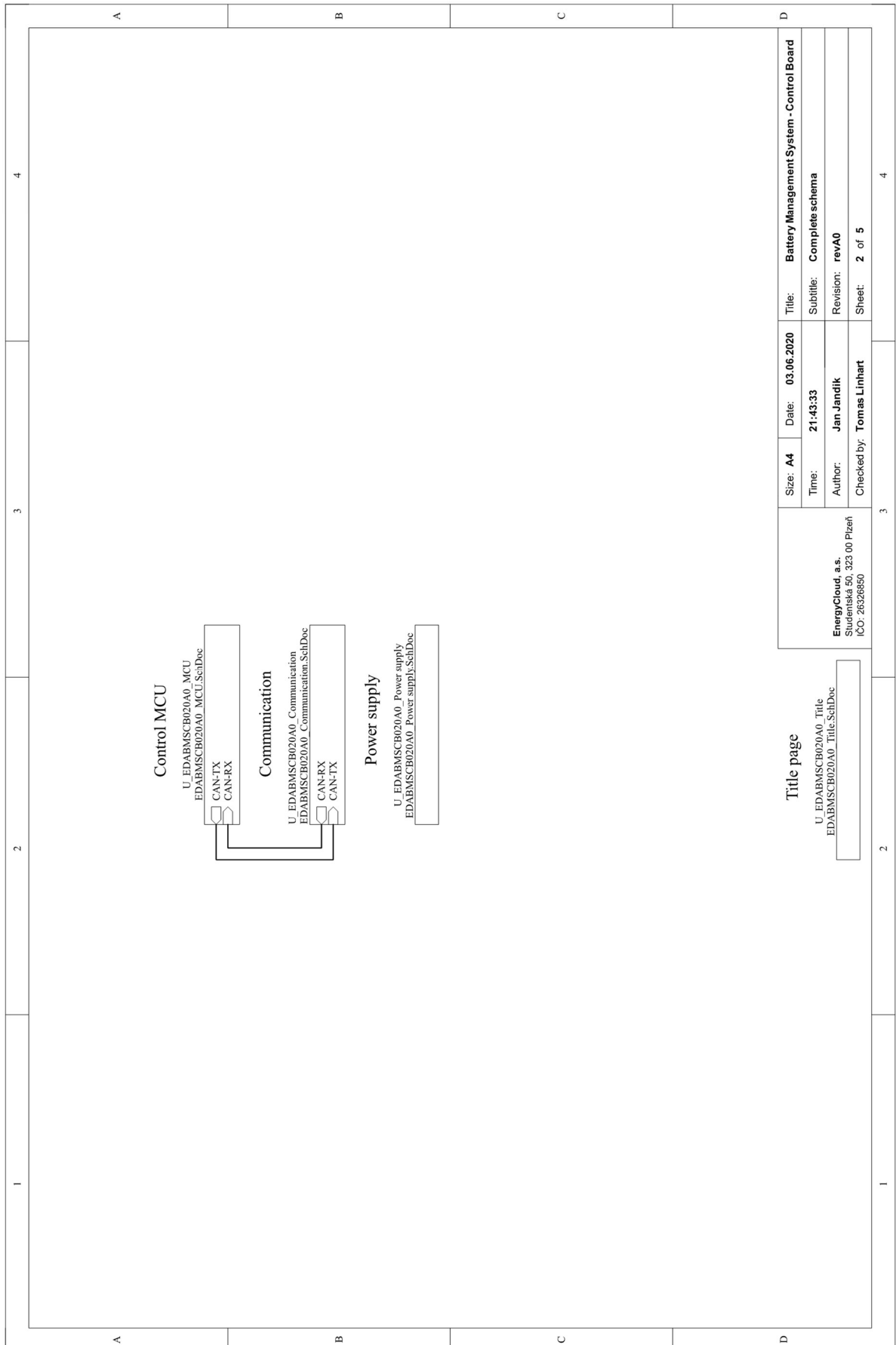
Příloha C – Schéma výkonové desky – spodní balancér



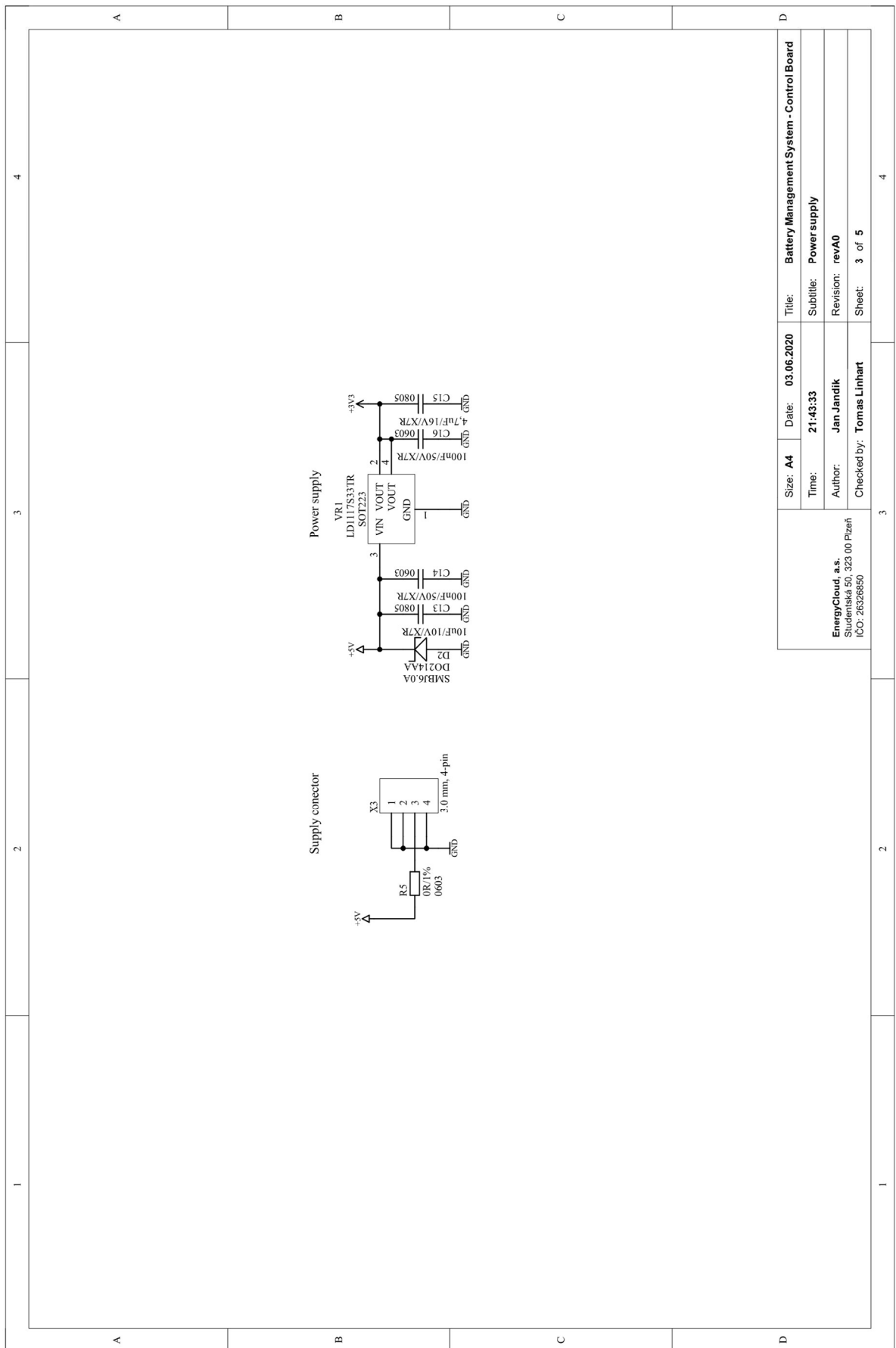
Příloha D – Schéma výkonové desky – horní balancér



Příloha E – Schéma řídicí desky – hierarchická struktura



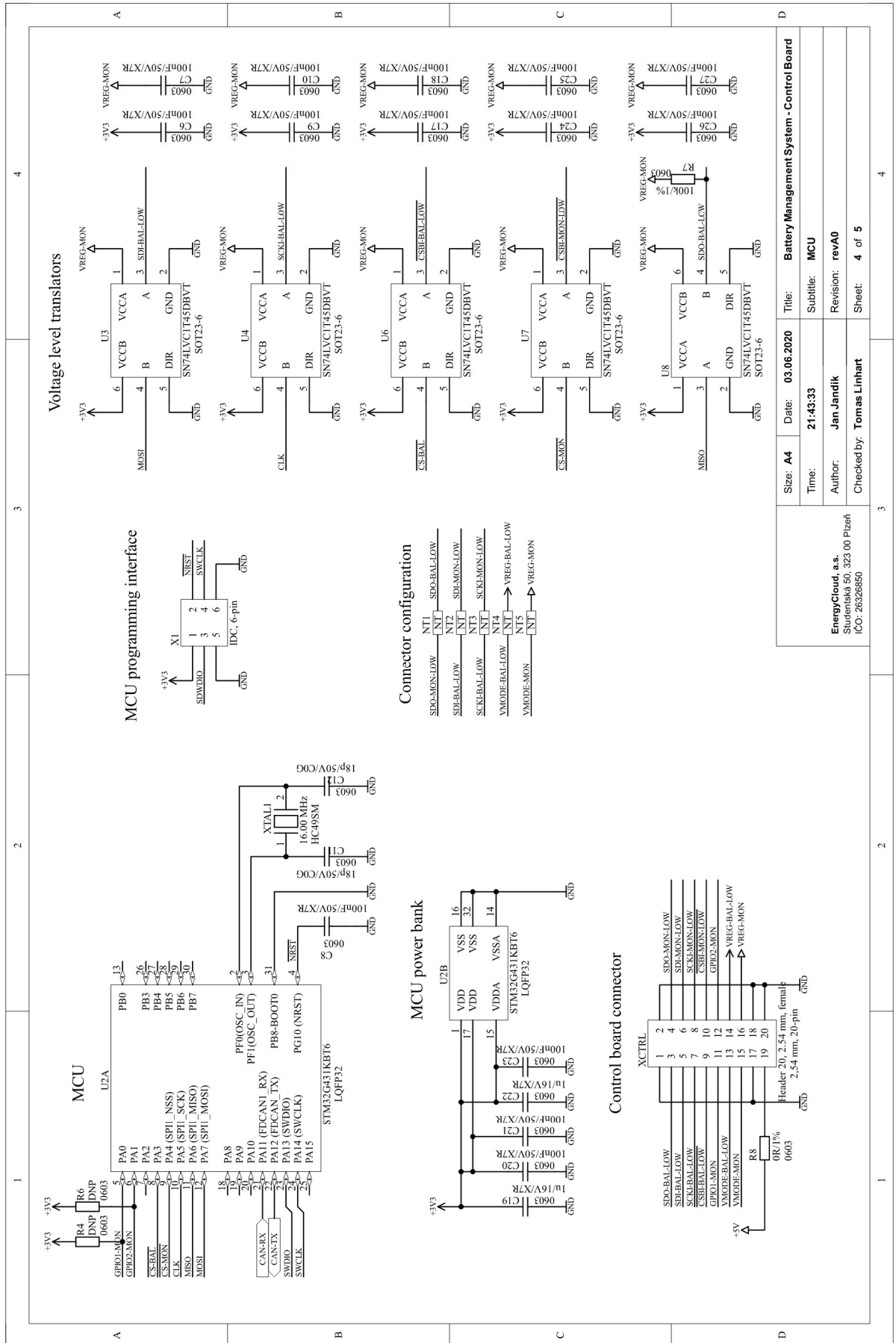
Příloha F – Schéma řídicí desky – napájení



Size: A4	Date: 03.06.2020	Title: Battery Management System - Control Board
Time: 21.43.33	SubTitle: Power supply	
Author: Jan Jandík	Revision: revA0	
Checked by: Tomas Linhart	Sheet: 3 of 5	

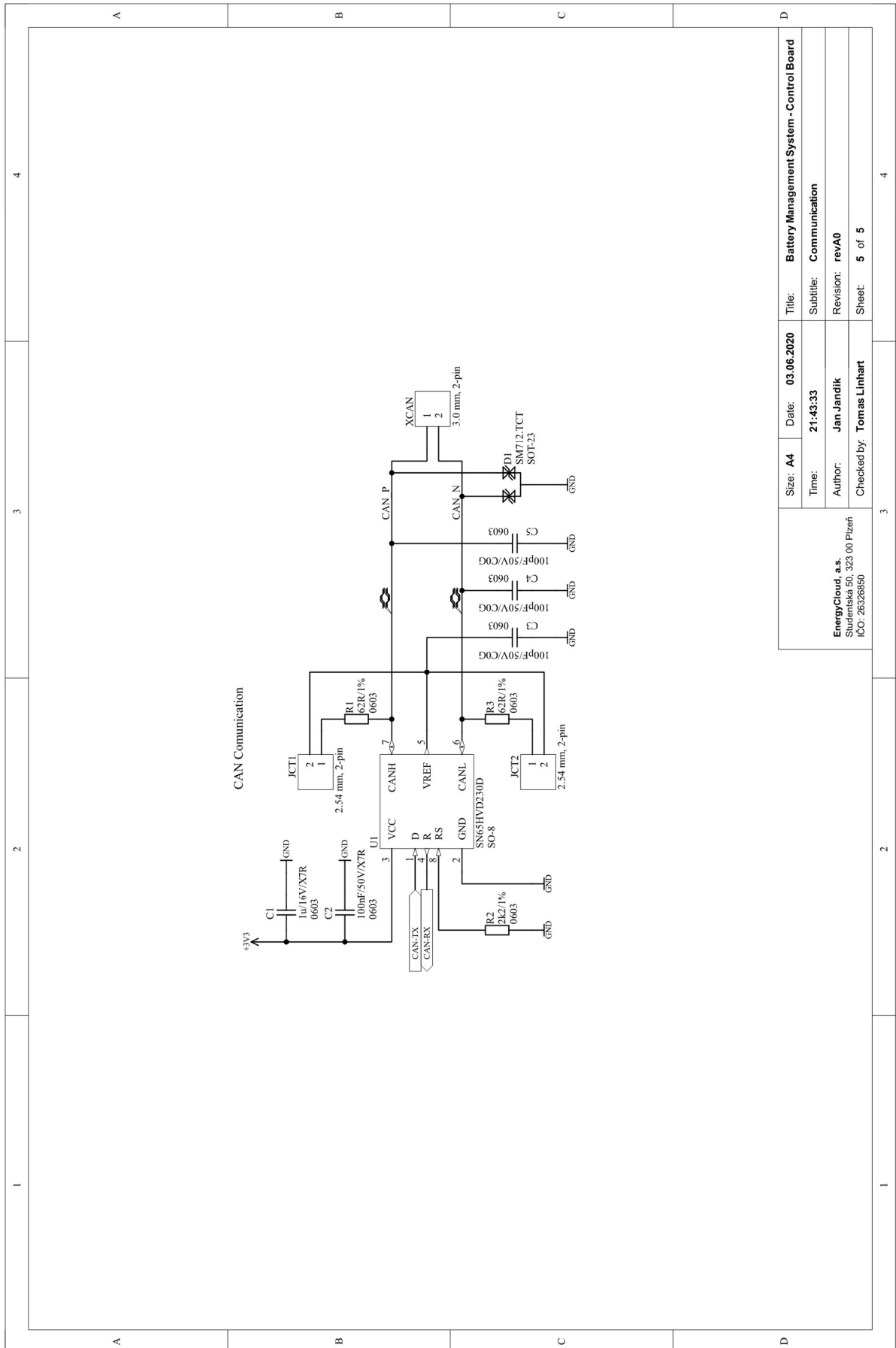
EnergyCloud, s.r.o.
 Strojnická 80, 323 00 Píseň
 IČO: 26326690

Příloha G – Schéma řídicí desky – MCU



Size: A4	Date: 03.06.2020	Title: Battery Management System - Control Board
Time: 21:43:33	Author: Jan Jandík	Subtitle: MCU
Checked by: Tomas Linhart	Revision: revA0	
	Sheet: 4 of 5	

Příloha H – Schéma řídicí desky – komunikační rozhraní



Size: A4	Date: 03.06.2020	Title: Battery Management System - Control Board
Time: 21:43:33	Author: Jan Jandík	Subtitle: Communication
Checked by: Tomas Linhart	Revision: revA0	Sheet: 5 of 5
EnergyCloud, a.s. Studentská 50, 323 00 Píseň IČO: 26326650		