



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra měření

Inteligentní powerbanka pro magnetometry

Intelligent Power Bank for Magnetometers

Bakalářská práce

Studijní program: Kybernetika a robotika

Studijní obor: Systémy a řízení

Vedoucí práce: Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.

Ondřej Bureš

Praha 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bureš** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **456990**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Systemy a řízení**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Inteligentní powerbanka pro magnetometry

Název bakalářské práce anglicky:

Intelligent Power Bank for Magnetometers

Pokyny pro vypracování:

- Navrhněte a realizujte vysokokapacitní powerbanku založenou na Li-ion akumulátorech tak, aby:
 - výsledné zapojení zajišťovalo kompletní ochranu použitých akumulátorů a jejich nabíjení,
 - bylo možné hardwarově nebo softwarově nastavit několik různých úrovní výstupního napětí.
- Zařízení bude obsahovat mikrokontrolér a displej pro interakci s uživatelem (zobrazení aktuální zbývající kapacity a dalších diagnostických údajů).
- Volitelně prozkoumejte a případně realizujte možnost předání zprávy o malé zbývající kapacitě, například pomocí sítě GSM.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Rob Toulson, Tim Wilmshurst: Fast and Effective Embedded Systems Design, Newnes 2017
- [2] Mark I. Montrose: EMC and the Printed Circuit Board: Design, Theory, and Layout Made Simple, IEEE 1999
- [3] Vít Záhlava: Návrh a konstrukce DPS, Ben 2010

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D., 13138

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

Datum zadání bakalářské práce: **22.01.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze dne: _____

Podpis: _____

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé práce Ing. Vojtěchu Petruchovi, Ph.D za trpělivost a jeho rady při zpracovávání této práce. Také děkuji rodině za podporu v průběhu celého studia

Abstrakt

Cílem této práce je návrh a realizace vysokokapacitní powerbanky s Li-Ion akumulátory, která zajišťuje nabíjení včetně ochrany použitých akumulátorů s možností informování uživatele o stavu dostupné energie. Návrhem zařízení se myslí tvorba schématu, vytvoření desky plošných spojů včetně jejího osazení a napsání firmwaru pro použitý mikrokontrolér. Realizací je míněno následné oživení navrženého zařízení.

Klíčová slova

powerbanka, akumulátor, mikrokontrolér, STM32, nabíjení

Abstract

The aim of this thesis is to design and realize high capacity power bank powered by Li-Ion accumulators that provides charging including protection of those accumulators with a possibility to inform the user about available energy. Design of the facility means a creation of schematic and circuit board including its soldering and writing firmware for a used microcontroller. By realization is meant getting the device to work.

Keywords

power bank, accumulators, microcontroller, STM32, charging

Obsah

1	Úvod.....	10
1.1	Úvod a motivace.....	10
1.2	Komerčně dostupná řešení	10
1.2.1	Viking Smartech II 40 Ah	10
1.2.2	DOCA Powerbank 95 Ah.....	11
1.2.3	Nejvhodnější z komerčně dostupných řešení	11
1.2.4	Porovnání komerčního a mého zařízení	11
1.3	Problematika akumulátorů.....	12
1.3.1	Nikl-kadmiové (Ni-Cd) a Nikl-Metal-Hydridové (NiMH) akumulátory	12
1.3.2	Olověné akumulátory	13
1.3.3	Lithium-Ionové akumulátory (Li-Ion).....	13
1.3.4	Lithium-Polymerové akumulátory (Li-Pol).....	13
1.3.5	Použitý typ akumulátoru.....	13
2	Možnosti dálkového bezdrátového přenosu dat	14
2.1	GSM (Globální Systém pro Mobilní komunikaci).....	14
2.2	Low Power Wide Area Network (LPWAN)	14
2.2.1	Sigfox	14
2.2.2	LoRaWAN.....	16
2.3	Použitý typ přenosu dat	16
3	Návrh a realizace první verze inteligentní powerbanky pro magnetometry.....	17
3.1	Blokové schéma	17
3.1.1	Návrh zařízení	18
3.1.2	Realizace a testování	18
3.1.3	Důvody návrhu druhé verze	20
4	Návrh druhé verze powerbanky.....	21
4.1	Blokové schéma	21
4.2	Použité obvody.....	23
4.2.1	Nabíječka článků	23
4.2.2	Balancér.....	25
4.2.3	Výstupní měnič napětí.....	27
4.2.4	Interní měnič napětí.....	29
4.2.5	Řídící mikrokontrolér	30
4.2.6	LCD	34
4.2.7	IoT	34
4.2.8	Měření teploty	35

4.2.9	Zapínání zařízení	36
4.2.10	Uživatelská tlačítka	36
5	Návrh DPS druhé verze powerbanky	37
5.1	Potlačení indukčního charakteru spojových cest.....	37
5.2	Návrh spínaných regulátorů snižujících napětí	37
5.3	Výhody použití rozlité mědi.....	39
5.3.1	Minimalizace úbytku napětí na vedení.....	39
5.3.2	Zvýšení kapacity.....	39
5.3.3	Lepší odvod tepla	40
5.4	Zapojení rezistorů měřící proud	40
5.5	Rozložení na DPS.....	41
6	Firmware	42
6.1	Použité programy a knihovny k vytvoření firmwaru.....	42
6.2	Struktura kódu	42
6.2.1	Hlavní cyklus.....	42
6.2.2	Obsluha tlačítek.....	43
6.2.3	Timer generující frekvenci	43
7	Konstrukce a ovládání	44
7.1	Význam jednotlivých tlačítek.....	44
7.2	Význam jednotlivých LED.....	44
8	Měření parametrů	45
8.1	Měření parametrů výstupního napěťového regulátoru	45
8.2	Měření efektivity interního napěťového regulátoru	47
8.3	Měření parametrů nabíjecího obvodu.....	47
8.4	Ověření správného chování balancéru.....	48
8.5	Měření teploty zařízení.....	48
9	Závěr.....	49
	Přílohy	I
A	Fotografie zařízení.....	I
B	Schéma zařízení.....	IV
C	DPS.....	VIII
D	Obsah CD	XII

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Viking Smartech II (převzato z [2])	10
Obr. 1.2: DOCA Powerbank 95 Ah (převzato z [4]).....	11
Obr. 1.3: Graf zachycující závislost hustoty energie na hmotnosti (převzato z [7])	12
Obr. 1.4: Představitelé typů akumulátorů a - Olověný akumulátor se jmenovitým napětím 12 V a kapacitou 7 Ah (převzato z [8]) b - Li-Ion akumulátor se jmenovitým napětím 3.7 V a kapacitou 3.4 Ah (převzato z [9]) c - Li-Pol akumulátor se jmenovitým napětím 3.7 V a kapacitou 4 Ah (převzato z [10])	12
Obr. 2.1: Pokrytí ČR sítě Sigfox ke dni 11. 2. 2018 (převzato z [18]).....	15
Obr. 2.2: Celosvětové pokrytí sítě Sigfox ke dni 11. 2. 2018 (převzato z [18])	15
Obr. 2.3: LPWAN Sigfox node (převzato z [12])	15
Obr. 2.4: Pokrytí sítě LoRaWan v ČR ve 3. čtvrtletí (převzato z [21]).....	16
Obr. 2.5: LoRaWan modul (převzato z [20])	16
Obr. 3.1: Blokové schéma 1. veze powerbanky	17
Obr. 3.2: DPS první verze inteligentní powerbanky pro magnetometry	18
Obr. 3.3: Ukázka komunikace BQ40Z60 s PC.....	19
Obr. 3.4: Zachycení testování DPS	19
Obr. 4.1: Blokové schéma nabíjení	22
Obr. 4.2: Blokové schéma vybíjení	22
Obr. 4.3: Schéma zapojení ochranných prvků.....	24
Obr. 4.4: Schéma nabíjecího obvodu	25
Obr. 4.5: Část schématu ukazující jeden stupeň balancéru	26
Obr. 4.6: Simulace jednoho stupně balancéru (Vytvořeno v programu Multisim)	26
Obr. 4.7: Simulace jednoho stupně balancéru (Vytvořeno v programu Multisim)	27
Obr. 4.8: Schéma výstupního napěťového regulátoru.....	29
Obr. 4.9: Schéma vnitřního napěťového regulátoru.....	29
Obr. 4.10: Schéma napěťového děliče.....	32
Obr. 4.11: Schéma zapojení obvodu měřícího napětí článků.....	33
Obr. 4.12: Typické zapojení využívající analogově digitálního převodníku (Převzato z [32]).....	33
Obr. 4.13: Schéma zapojení displeje	34
Obr. 4.14: Schéma zapojení konektoru pro IoT modul	35
Obr. 4.15: Schéma zapojení měření teploty	35
Obr. 4.16: Schéma zapojení zapínacího obvodu	36
Obr. 4.17: Schéma zapojení uživatelských tlačítek.....	36
Obr. 5.1: Možnosti připojení napájení (a – špatně, b – správně) (zelený blok značí napájení, červený blok napájený obvod)	37
Obr. 5.2: Část DPS zachycující návrh výstupního napěťového regulátoru.....	38
Obr. 5.3: Část schématu zachycující proudovou smyčku při dodávání energie do indukčnosti	38
Obr. 5.4 : Část schématu zachycující proudovou smyčku při využívání energie z indukčnosti	38
Obr. 5.5 : Část schématu zachycující přibližnou velikost plochy potřebnou k určení kapacity.....	40
Obr. 5.6: Návrh snímacích rezistorů na DPS.	40
Obr. 5.7: Rozložení jednotlivých obvodů na DPS.	41
Obr. 6.1: Činnost firmware powerbanky	43
Obr. 7.1: Plánovaný přední panel.....	44
Obr. 8.1: Schéma zapojení napěťového regulátoru při měření parametrů.	45
Obr. 8.2: Graf ukazující závislost efektivity na odebíraném proudu pro 4 úrovně výstupního napětí..	45
Obr. 8.3: Graf ukazující závislost efektivity výstupního regulátoru na odebíraném proudu pro výstupní napětí 11.5 V a vstupní napětí od 12 do 16.8 V	46

Obr. 8.4: Průběh činnosti výstupního regulátoru při odebíraném proudu 2 A [Pořízeno na osciloskopu LeCroy WaveJet] (tyrkysová-frekvence regulátoru, fialová-průběh vstupního napětí, žlutá-průběh výstupního napětí)	46
Obr. 8.5: Graf ukazující závislost efektivity interního regulátoru na odebíraném proudu pro vstupní napětí od 12 do 16.8 V	47
Obr. 8.6: Graf ukazující závislost velikosti odebíraného proudu na přiloženém napětí na jednom stupni balancéru	48
Obr. 8.7: Snímek ukazující nejvyšší teplotu při provozu výstupního napěťového regulátoru [Zachyceno termokamerou Testo 875-1]	48
Obr. A.1: Osazená deska plošných spojů zařízení (2. verze)	I
Obr. A.2: Zařízení se zobrazenými základními údaji (2. verze).....	II
Obr. A.3: Význam základních údajů (2. verze).....	II
Obr. A.4: Zařízení se zapnutým menu (2. verze)	III
Obr. A.5: Osazená deska plošných spojů zařízení (1. verze)	III
Obr. B.1: Celkové schéma zařízení (2. verze).....	IV
Obr. B.2: Schéma nabíječky článků, na Obr. B.1 blok <i>Charger</i> (2. verze).....	IV
Obr. B.3: Schéma spínaných napěťových regulátorů, na Obr. B.1 blok <i>Converters</i> (2. verze).....	V
Obr. B.4: Schéma zapojení mikrokontroléru, na Obr. B.1 blok <i>STM32L433CCT6</i> (2. verze).....	V
Obr. B.5: Schéma spínaných napěťových regulátorů, na Obr. B.1 blok <i>Battery pack</i> (2. verze).....	VI
Obr. B.6: Celkové schéma zařízení (1. verze).....	VII
Obr. C.1: Vrstva TOP s potiskem (2. verze)	VIII
Obr. C.2: Vrstva BOT (2. verze)	IX
Obr. C.3: Vrstva TOP s potiskem (1. verze)	X
Obr. C.4: Vrstva IN1 (1. verze).....	X
Obr. C.5: Vrstva IN3 (1. verze).....	XI
Obr. C.6: Vrstva BOT (1. verze).....	XI

Seznam tabulek

Tab. 4.1: Seznam analogových vstupů použitého mikrokontroléru	30
Tab. 4.2: Seznam digitálních vstupů použitého mikrokontroléru	31
Tab. 4.3: Seznam digitálních výstupů použitého mikrokontroléru	31
Tab. 4.4: Seznam ostatních pinů použitého mikrokontroléru.....	32
Tab. 4.5: Vztah mezi snímaným napětím, rozlišením a napětím článků.....	32
Tab. 8.1: Hodnoty získané při nabíjení článků.....	47

1 Úvod

1.1 Úvod a motivace

Cílem této bakalářské práce je návrh a realizace vysokokapacitní inteligentní powerbanky určené pro magnetometry a seznámení tak s dostupnými možnostmi řešení jejich výroby. Úkolem zařízení je dodávání elektrické energie o výkonu přibližně 2 W magnetometrům určeným pro monitorování zemského magnetického pole i na místech, kde není přítomná rozvodná síť po dobu jednoho až dvou dní.

Magnetometry a jim podobná zařízení se dají napájet i z baterií či akumulátorů bez použití inteligentního prvku pro správu baterie, ale při provozu může dojít k destrukci napájecích článků nebo dokonce ke zničení napájeného zařízení. Důvodem přidání obvodu pro správu článků není jen jejich ochrana. Použití powerbanky totiž navíc přináší přehled o stavu článků, poskytuje informace o dostupné kapacitě, velikosti odebíraného proudu, teplotě a další užitečné informace.

Powerbanku lze využít pro jakákoli zařízení, jejichž vstupní napětí je 11.5, 9, 5 nebo 3.3 V s maximálním odebíraným proudem 2 A. Případně je možné využít neregulované napětí z akumulátorů od 12 do 16.8 V.

1.2 Komerčně dostupná řešení

Na trhu je v dnešní době mnoho dostupných modelů powerbank. Předtím, než jsem začal s návrhem powerbanky, jsem prozkoumal možnosti, které trh nabízí. Jsou zde uvedeny dvě powerbanky, jejichž výstupní napětí může být nastaveno na hodnotu přibližně 12 V a jsou schopny dodat proud alespoň 2 A.

1.2.1 Viking Smartech II 40 Ah

Tato powerbanka, kterou lze vidět na Obr. 1.1, disponuje šesti úrovněmi výstupního napětí s maximálním odebíraným proudem až 4.7 A. Úroveň dostupné kapacity z 40 Ah zobrazuje pomocí LED displeje. Nepodporuje dálkový přenos informace o stavu nabití a ani není vhodná k použití v kritičtěších podnebních podmínkách, jako je například déšť [1].



Obr. 1.1: Viking Smartech II (převzato z [2])

1.2.2 DOCA Powerbank 95 Ah

Oproti předchozí powerbance, jejíž pořizovací cena je 4000 Kč, tato stojí 9000 Kč. Lze ji vidět na Obr. 1.2. Tento model disponuje kapacitou 95 Ah s několika úrovněmi výstupního napětí a je možné jej použít jako zdroj síťového napětí či svítilnu. I když je tento model určen k použití pro kempování, nemá voděodolný kryt, a proto také není vhodný pro použití za deště či vlhka. Navíc ani tento model nepodporuje funkci dálkového přenosu dat [3].



Obr. 1.2: DOCA Powerbank 95 Ah (převzato z [4])

1.2.3 Nejvhodnější z komerčně dostupných řešení

Nejlepšími parametry z dostupných powerbank disponuje powerbanka od firmy DOCA. Tento model ale nabízí několik funkcí, které pro napájení magnetometrů nejsou potřeba, a je zbytečné za ně platit. Navíc, jak je uvedeno výše, ani jedna z powerbank nepodporuje dálkový přenos dat a není vhodná k použití za deště či vlhka.

1.2.4 Porovnání komerčního a mého zařízení

Moje powerbanka by oproti zmíněným měla být použitelná v terénu, což mimo jiné znamená, že by její finální verze měla odolat vlhku či dešti. Dále je plánovaná podpora dálkového přenosu informace, díky kterému lze zajistit včasné nabití powerbanky. Po průzkumu trhu bylo tedy rozhodnuto, že žádná z dostupných powerbank není pro napájení magnetometrů vhodná. Z tohoto důvodu budu pokračovat v návrhu inteligentní powerbanky pro magnetometry a následné realizaci.

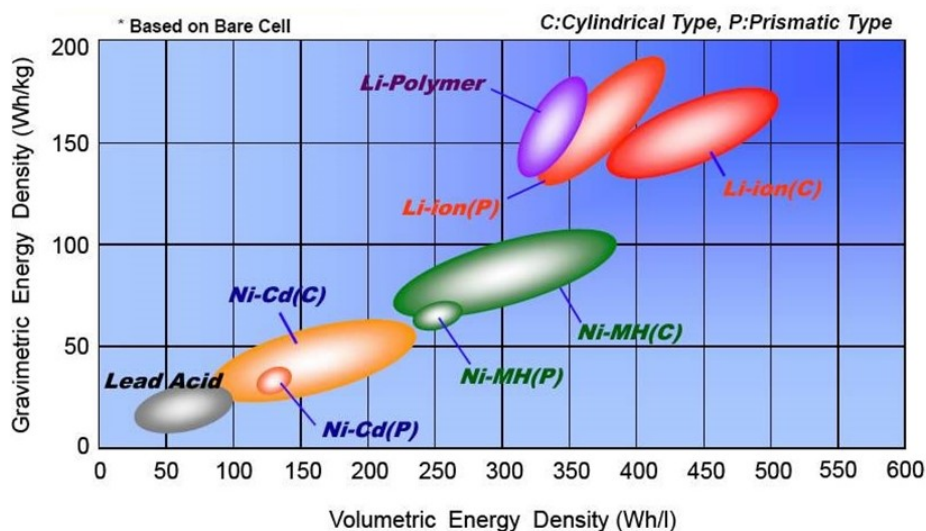
1.3 Problematika akumulátorů

V powerbankách bývá uložena energie pomocí galvanických článků. Galvanický článek je tvořen ze dvou elektrod umístěných v elektrolytu. Po jejich umístění do určité chemické látky můžeme naměřit na těchto elektrodách elektrické napětí, které se liší v závislosti na použitých elektrodách a elektrolytu. Napětí, které můžeme očekávat, lze zjistit s pomocí Beketovy řady napětí kovů [5].

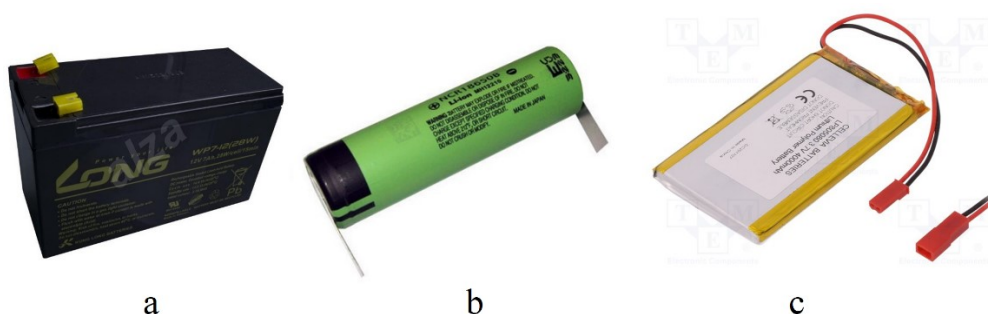
V powerbance se zpravidla používají akumulátory, tedy sekundární články a nikoli primární články. Akumulátoru, na rozdíl od primárního článku, lze energii, po jejím spotřebování, znovu dodat. V dnešní době je 5 druhů akumulátorů, o kterých má smysl uvažovat pro použití v powerbance.

1.3.1 Nikl-kadmiové (Ni-Cd) a Nikl-Metal-Hydridové (NiMH) akumulátory

Tyto články mají oproti ostatním výhodu v jednoduchém nabíjení. Lze je realizovat zdrojem konstantního proudu, který se při detekci nabití vypne [6]. Tento typ se ale v dnešní době používá čím dál méně. Je to hlavně z toho důvodu, že mají oproti ostatním typům nízkou hustotu energie, jak je patrné z Obr. 1.3. Navíc oba tyto články trpí paměťovým efektem, a k použití v powerbance tedy není ani jeden z těchto dvou typů vhodný.



Obr. 1.3: Graf zachycující závislost hustoty energie na hmotnosti (převzato z [7])



Obr. 1.4: Představitelé typů akumulátorů

- a - Olověný akumulátor se jmenovitým napětím 12 V a kapacitou 7 Ah (převzato z [8])
- b - Li-Ion akumulátor se jmenovitým napětím 3.7 V a kapacitou 3.4 Ah (převzato z [9])
- c - Li-Pol akumulátor se jmenovitým napětím 3.7 V a kapacitou 4 Ah (převzato z [10])

1.3.2 Olověné akumulátory

Olověné akumulátory nemají vysokou hustotu energie, ale cenově jsou velmi přijatelné v poměru s dostupnou kapacitou [11], a proto jsou velmi používaným typem. Tyto akumulátory však nejsou určené k častému nabíjení a vybíjení, což je pro použití v powerbance poměrně nepříjemné. Pro názornost je na Obr. 1.4.a uveden představitel tohoto typu, se jmenovitým napětím 12 V a kapacitou 7 Ah.

1.3.3 Lithium-Iontové akumulátory (Li-Ion)

Tyto články mají oproti předchozím daleko vyšší energetickou hustotu, což mimo jiné znamená, že při potřebě navýšení kapacity nedojde k příliš velké změně rozměrů. Navíc mají poměrně vysoké nominální napětí 3.7 V a nízké samovybíjení. Představitelem tohoto typu jsou válcové akumulátory o průměru 18 mm a výšce 65 mm (Obr. 1.4.b). Díky těmto rozměrům jsou označovány číslem 18650. Nevýhodou akumulátoru je neustálá potřeba kontroly hodnoty napětí, aby nedošlo k hlubokému vybití nebo naopak k přebití. Také je žádoucí měřit jejich teplotu, jelikož vysoká teplota může vést k devastacím jevům. Lze tedy vyvodit, že jejich nabíjení a kontrola je složitá, alespoň oproti předchozím typům.

1.3.4 Lithium-Polymerové akumulátory (Li-Pol)

Tento typ akumulátorů je velmi podobný Lithium-Iontovým. Vyrábí se v několika různých rozměrech a díky tomu své využití často nachází tam, kde je třeba přidat akumulátor konkrétních rozměrů. Používají se například v mobilních telefonech, tabletech či modelářských zařízeních. Na Obr. 1.4.c je zobrazen jeden článek se jmenovitým napětím 3.7 V a kapacitou 4 Ah. Akumulátory tohoto typu nebývají příliš odolné. Trpí více na mechanické poškození než zmíněné akumulátory 18650 a jsou tedy méně bezpečné.

1.3.5 Použitý typ akumulátoru

Po zvážení možností byl vybrán Li-Ion akumulátor 18650. S tímto řešením, lze nastavit cenově přijatelně a snadno libovolnou kapacitu podle počtu článků. Pro kapacitu 6.8 Ah při jmenovitém napětí 14.8 V bylo vybráno 8 článků s kapacitou 3400 mAh [9] v zapojení 4S2P, tedy 4 v sérii a 2 paralelně. Energetická kapacita článků s uvažovanou hodnotou jmenovitého napětí je 100.6 Wh, což umožňuje dodávání elektrické energie o výkonu 2 W magnetometrům po dobu 2 dní.

2 Možnosti dálkového bezdrátového přenosu dat

Dálkový přenos je možné realizovat několika způsoby. V dnešní době je velmi rozšířen pojem Internet věcí nazývaný IoT¹. IoT je označení pro síť chytrých přístrojů, které lze snadno monitorovat či ovládat pomocí internetové sítě. Zařízení je možné připojit k internetu několika způsoby. V domácnosti to bývá pomocí WLAN² a v terénu je optimální využít nízkopříkonové technologie LPWAN (Low Power Wide Area Network). Internet věcí však zahrnuje i jiné sítě, například síť GSM (Globální Systém pro Mobilní komunikaci) [12].

2.1 GSM (Globální Systém pro Mobilní komunikaci)

GSM spadá do kategorie sítí druhé generace (2G), která oproti první přenáší informace digitálně. Dnes se používá pro mobilní komunikaci a v průmyslové elektronice. Výhodou tohoto řešení je vysoké pokrytí. Protože tento způsob komunikace podporují téměř všechny mobilní telefony a využívá ji i mnoho průmyslových zařízení, která data přenáší jen po této síti, je nepravděpodobné její zrušení. [13]

Pro tuto variantu existuje několik desítek funkčních zapojení, která lze jednoduše realizovat. Mezi představitele zprostředkování této komunikace patří firma SIMCom, jejíž moduly lze použít ve spojení s mikrokontrolérem jako je i STM32. K takovéto komunikaci lze využít moduly řady sim800, konkrétně sim800h s cenou přibližně 230 Kč [14]. Nevýhodou této technologie je energetická náročnost. Například odběr modulu sim800h dosahuje při vysílání ve špičce až 2 A [15].

2.2 Low Power Wide Area Network (LPWAN)

V České republice jsou nejznámějšími představiteli této technologie Sigfox a LoRaWAN³.

2.2.1 Sigfox

Sigfox je technologie, kterou v ČR propagují firmy SimpleCell a T-Mobile. Využívá 200 kHz z veřejně dostupného bezlicenčního pásma (Pro Českou Republiku na frekvenci 868 MHz), ve kterém využívá k přenosu dat Ultra Narrow Band (ultra úzkého pásma) a DBPSK⁴ modulace. Při přenosu dat zabere zpráva 100 Hz z použitého pásma a je přenášena rychlostí 100 nebo 600 bitů za sekundu [16].

Jak je ukázáno na Obr. 2.1, Sigfox pokrývá již 94 % území ČR a pokrytí stále roste. Obr. 2.2 navíc ukazuje, že by neměl být problém zařízení použít například i v Německu či na Slovensku.

Existuje několik modulů umožňujících využití této technologie. Jako nejdostupnější byl vybrán modul LPWAN Sigfox Node UART modem, který je zobrazen na Obr. 2.3. Lze jej koupit přibližně za 300 Kč i s předplaceným jedním rokem provozu. Je možné ho napájet napětím 1.8 V až 3.6 V. Jeho odběr je při odesílání maximálně 65 mA a při příjmu 15 mA. V režimu spánku je odběr okolo 2 μ A [17].

Nevýhodou použití této technologie je omezení v odeslání pouze 144 zpráv o velikosti 0 až 12 bytů a v příjmutí jen 4 osmibytových zpráv denně. Jelikož je primární určením technologie Sigfox posílat data za nízkou cenu a s minimální spotřebou energie, je Sigfox i vzhledem k jeho pokrytí vhodným kandidátem k použití v inteligentní powerbance.

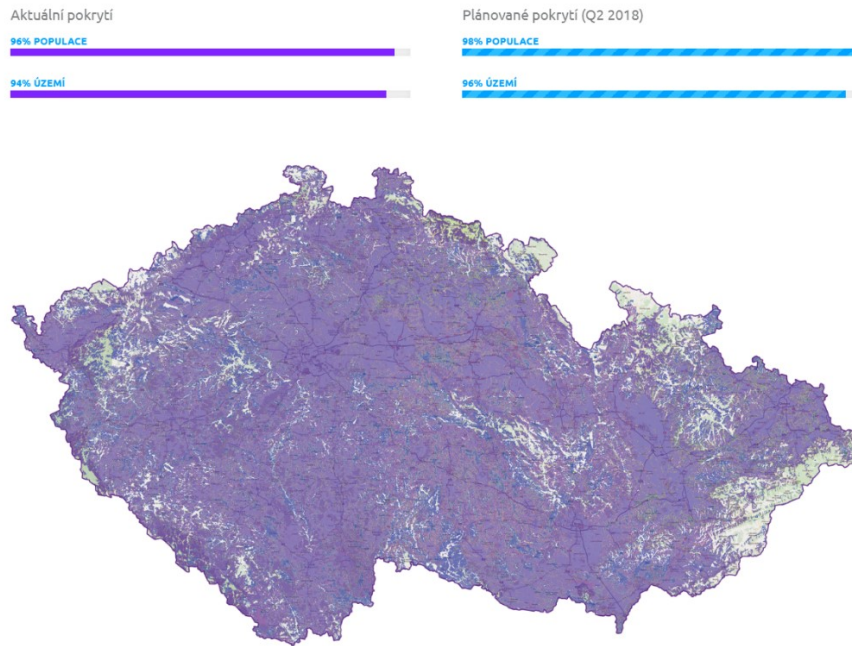
¹ Internet of Things

² Wireless Local Area Network

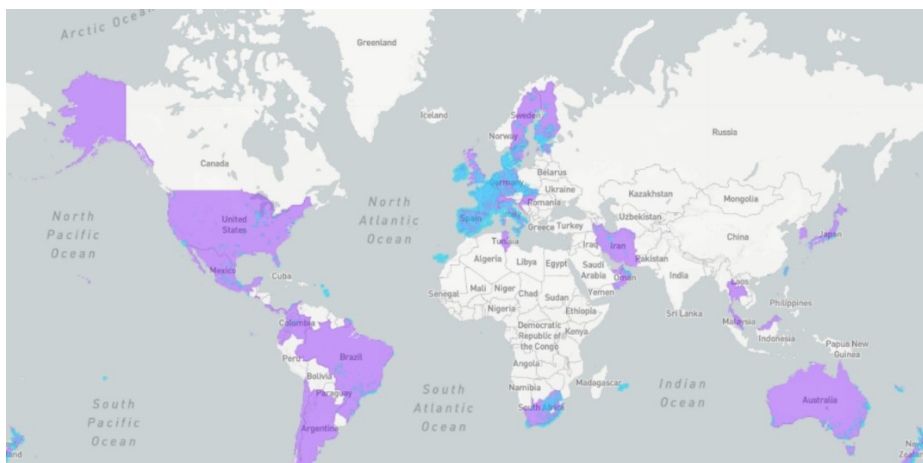
³ Long Range Wide Area Network

⁴ Differential Binary Phase Shift Keying

2 - Možnosti dálkového bezdrátového přenosu dat



Obr. 2.1: Pokrytí ČR sítě Sigfox ke dni 11. 2. 2018 (převzato z [18])



Obr. 2.2: Celosvětové pokrytí sítě Sigfox ke dni 11. 2. 2018 (převzato z [18])



Symbol	Parameter	Min	Typ.	Max	Unit
VCC	Module input voltage	1.8	3.3	3.6	V
Current	Tx Current (@"15" setting, CW)	-	65	-	mA
	Tx Current (@"14" setting, CW)	-	54	-	mA
	Rx Current	-	15	-	mA
	Sleep Current	-	2	-	µA

Obr. 2.3: LPWAN Sigfox node (převzato z [12])

2.2.2 LoRaWAN

LoRaWAN je technologie, kterou v ČR propaguje CRA⁵. Stejně jako Sigfox, je i toto nízkopříkonová technologie, která se využívá i v ostatních zemích světa. Její pokrytí v ČR je zachyceno na Obr. 2.4. K přenosu dat využívá LoRaWAN LoRa modulace, která je odvozená z modulace s rozprostřeným spektrem (Chirp Spread Spectrum). Oproti předchozí technologii využívá širšího přenosového pásma, typicky 125 kHz, 250 kHz či 500kHz a Nabízí rychlost od 300 bit/s do 50 000 bit/s [19].

Pomocí této technologie lze posílat zprávy častěji a s příjmem není problém jako u Sigfox technologie. LoRa má však menší pokrytí než Sigfox, alespoň v ČR. Modul zobrazený na Obr. 2.5, který lze využít i v ČR, je možné pořídit za cenu okolo 500 Kč [20]. S tímto modulem lze komunikovat s pomocí sériové sběrnice SPI⁶.



Obr. 2.4: Pokrytí sítě LoRaWan v ČR ve 3. čtvrtletí (převzato z [21])



Parameter	Min	Typ	Max	Unite	Condition
Working condition					
Working voltage range	1.8	3.3	3.7	V	
Temperature voltage	-40		85	°C	
Current consumption					
RX current		10.8		mA	High performance mode
TX current		100		mA	@ 20dBm
Sleep current		<0.2		uA	

Obr. 2.5: LoRaWan modul (převzato z [20])

2.3 Použitý typ přenosu dat

Obě tyto technologie jsou vhodné z důvodu nízké energetické náročnosti a vysokého pokrytí území ČR, zdají se tedy být vhodné pro mé zařízení. Z důvodu velmi jednoduché implementace, velkého pokrytí území ČR a malé energetické náročnosti bylo rozhodnuto, že zařízení bude připravené na komunikaci prostřednictvím modulu IoT s využitím technologie Sigfox. Jelikož tento modul komunikuje prostřednictvím UART⁷, je možné místo něj využít jakéhokoli jiného modulu schopného komunikovat přes UART.

⁵ České Radiokomunikace a.s.

⁶ Serial Peripheral Interface

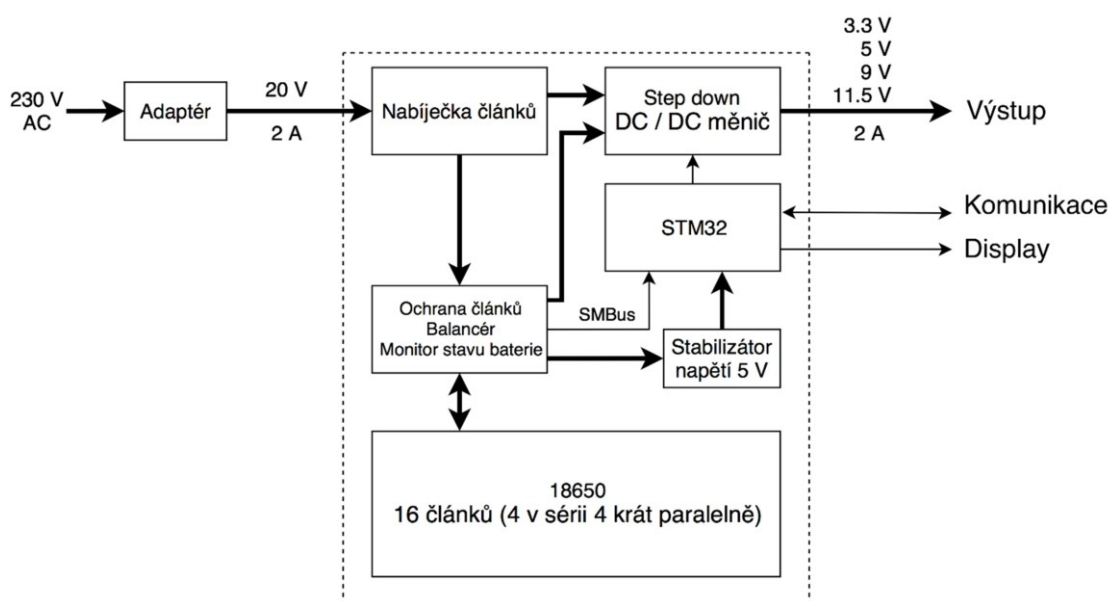
⁷ Universal Asynchronous Receiver / Transmitter

3 Návrh a realizace první verze inteligentní powerbanky pro magnetometry

V této kapitole je popsán návrh schématu, desky plošných spojů a následná realizace první verze inteligentní powerbanky pro magnetometry. Byl zde použit integrovaný obvod BQ40Z60 [22] od firmy Texas Instruments, který umožňuje správu baterie včetně nabíjení 2 až 4 v sérii zapojených Lithium-Iontových či Lithium-Polymerových akumulátorů a jejich ochranu.

3.1 Blokové schéma

Na Obr. 3.1. je uvedeno blokové schéma vysvětlující zapojení jednotlivých obvodů. Tato podkapitola vysvětluje, jak mělo zařízení podle návrhu fungovat.



Obr. 3.1: Blokové schéma 1. verze powerbanky

Přestože nabíjení i správu baterie spolu s jejich ochranou zajišťuje jeden obvod, je pro jasnější porozumění tento obvod rozložen v blokovém schématu do dvou částí. Jednou částí je nabíječka článků, jejíž funkci zajišťuje obvod regulováním stavu externě připojených MOSFET⁸ tranzistorů v závislosti na výstupním napětí a proudu. Další částí je monitorování stavu baterie včetně balancéru a ochrany článků. Pokud se liší napětí na článcích, je zajištěno aktivování balancéru a napětí na článcích se vyrovná. V případě, že je detekován nebezpečný stav, například vysoká teplota, napětí či proud, pak ochranný obvod přepálí pojistku SFH-1412B [23], čímž dojde k rozpojení obvodu. Výrobce v datasheetu k BQ40Z60 také doporučuje sekundární ochranný obvod, který byl pro větší bezpečnost při návrhu zapojení do schématu také přidán.

Informace o stavu baterie je možné od integrovaného obvodu získat využitím sběrnice SMBus⁹. Ke komunikaci bylo plánováno využít mikrokontrolér STM32, konkrétně modul NUCLEO-STM32L432KC. Úkolem mikrokontroléru je zobrazení přijatých dat na nízkopříkonový displej, případně jejich odeslání pomocí technologie Sigfox a podle nastavení přepínat úroveň výstupního napětí. Pro napájení modulu byl zvolen stabilizátor napětí na 5 V.

⁸ Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

⁹ System Management Bus

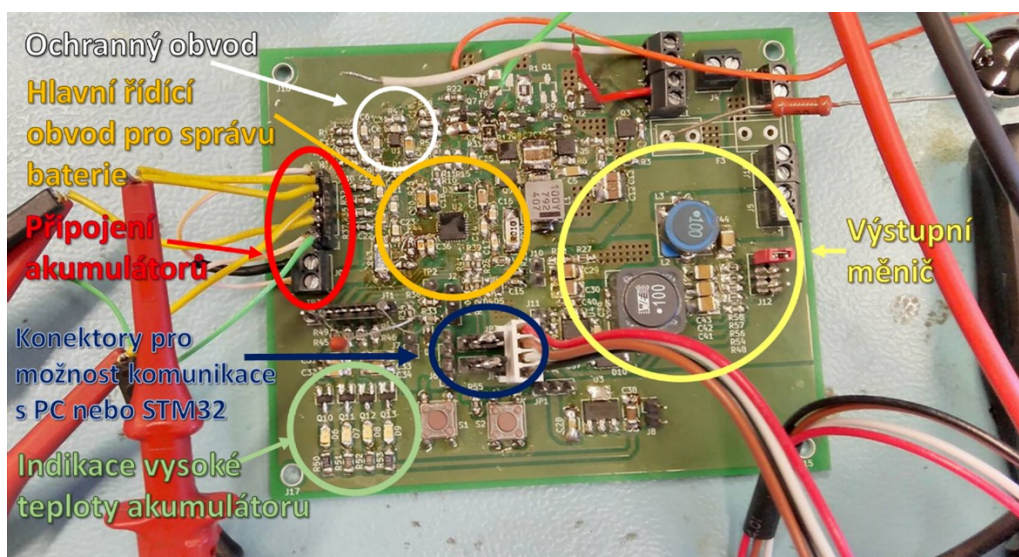
3.1.1 Návrh zařízení

Schéma zařízení i desky plošných spojů (DPS) byly navrženy s využitím EDA¹⁰ open source programu KiCad. Při návrhu zapojení obvodu BQ40Z60 a jeho periférií jsem se inspiroval zapojením vývojového kitu BQ40Z60EVM [24]. Do schématu byl přidán výstupní napěťový regulátor LMR14020-Q1, o kterém blíže pojednává kapitola 4.2.3 a konektory připravené pro komunikaci s displejem a mikrokontrolérem STM32.

Po dokončení schématu následoval návrh DPS (Desky Plošných Spojů). Z důvodu vysokých nároků obvodu BQ40Z60 na návrh DPS bylo třeba využít 4 vrstev. Čtyři vrstvy při návrhu napomohly minimalizaci proudových smyček a zvýšily tak odolnost vůči elektromagnetickému rušení. Z důvodů snížení nákladů na výrobu bylo rozhodnuto, že Nucleo spolu s LCD, tlačítky a případným modulem pro internet věci budou na samostatné desce.

3.1.2 Realizace a testování

Některé součástky, jako například BQ40Z60, bylo třeba zapájet horkovzdušnou pistolí, protože se nacházely jejich vývody i na spodní straně součástky. Ostatní součástky byly zapájeny pomocí mikropáječky s tepelnou regulací, pájky a tavidla. Osazená deska plošných spojů s popisem rozmístění jednotlivých částí obvodů je znázorněna na Obr. 3.2.



Obr. 3.2: DPS první verze inteligentní powerbanky pro magnetometry

Po osazení DPS bylo potřeba otestovat její funkčnost. Mimo jiné k tomu bylo potřeba propojovacího prvku EV2300 [25] a programu bqStudio (Texas Instruments), díky kterým bylo možné navázat komunikaci mezi DPS a PC.

Na Obr. 3.3 jsou uvedeny používané registry integrovaného obvodu BQ40Z60 a ukázán tak i průběh testování. Každý registr se skládá z 8 bitů, které jsou označeny zelenou nebo červenou barvou. Zelená barva značí úroveň logické 0, červená logickou 1. Testování probíhalo nastavením příslušných registrů do určité úrovně a následným určením správnosti stavu zařízení.

K ověřování správnosti funkce jsem použil laboratorní zdroj, multimetr, osciloskop a Lithium-Iontové články, které mi pro tyto účely poskytla společnost AVACOM s.r.o. V průběhu testování jsem narazil na několik nepříjemných záležitostí, které jsem po konzultaci s týmem Texas Instruments a vedoucím

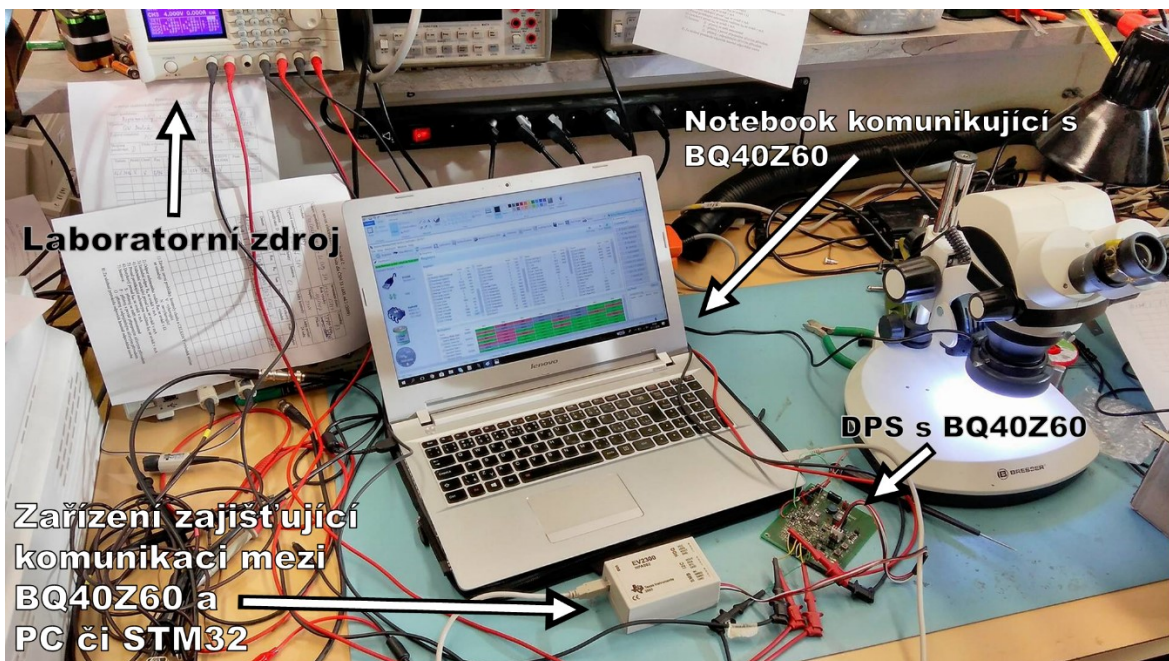
¹⁰ Electronic design automation

3 - Návrh a realizace první verze inteligentní powerbanky pro magnetometry

mé práce téměř vždy vyřešil. Většinou se problémy týkaly špatného porozumění velmi rozsáhlé technické dokumentaci k obvodu BQ40Z60. S potížemi nefunkčnosti nabíjení článků jsem se však nevypořádal ani po několika dnech studování technické dokumentace a konzultaci s odborníky z Texas Instruments [26].



Obr. 3.3: Ukázka komunikace BQ40Z60 s PC



Obr. 3.4: Zachycení testování DPS

3.1.3 Důvody návrhu druhé verze

O zprovoznění funkce nabíjení článků jsem se bezúspěšně pokoušel několik dní. Během testování byly zničeny 3 integrované obvody BQ40Z60 a důvod jejich destrukce nebyl jasný. Po proměření bylo zjištěno, že při zapnutí nabíjecího procesu dochází k nevratnému zkratování pinu integrovaného obvodu BQ40Z60 zodpovědného za řízení výkonového tranzistoru se zemí. Technická podpora z Texas Instruments mezi tím na problém s nabíjením odpověděla, že vzhledem k integraci několika funkcí včetně napěťového regulátoru, je obvod velmi citlivý na správnost návrhu desky plošných spojů a doporučují zvážit použití jiného obvodu. Doporučili mi však, že mohu vyzkoušet aktualizovat zařízení EV2300 na novější verzi. Bohužel by k aktualizaci bylo potřeba dalšího takového zařízení, a navíc by to problém s největší pravděpodobností nevyřešilo.

Kvůli poměrně nepřehledné dokumentaci (rozčlenění potřebných informací do několika souborů) a nejasnosti, proč dochází k destrukci integrovaného obvodu BQ40Z60, bylo rozhodnuto, že navrhnu zařízení jinak, s využitím méně složitých prvků. I když se tedy může zdát využití integrovaného obvodu umožňujícího několik funkcí zároveň výhodné, ukázalo se, že tomu tak vždy není.

4 Návrh druhé verze powerbanky

Při návrhu druhé verze powerbanky byl kladen důraz na separaci jednotlivých obvodů. Řídící obvod je tedy oddělen od výkonového nabíjecího obvodu i od balancéru článků, což navíc zpřehlednilo návrh. Stejně jako první verze, byla i tato navržena s využitím programu KiCad.

Dále je v této kapitole popsáno schéma a vysvětleno, jak jsem při návrhu postupoval od výběru daných komponent až po jejich zapojení.

4.1 Blokové schéma

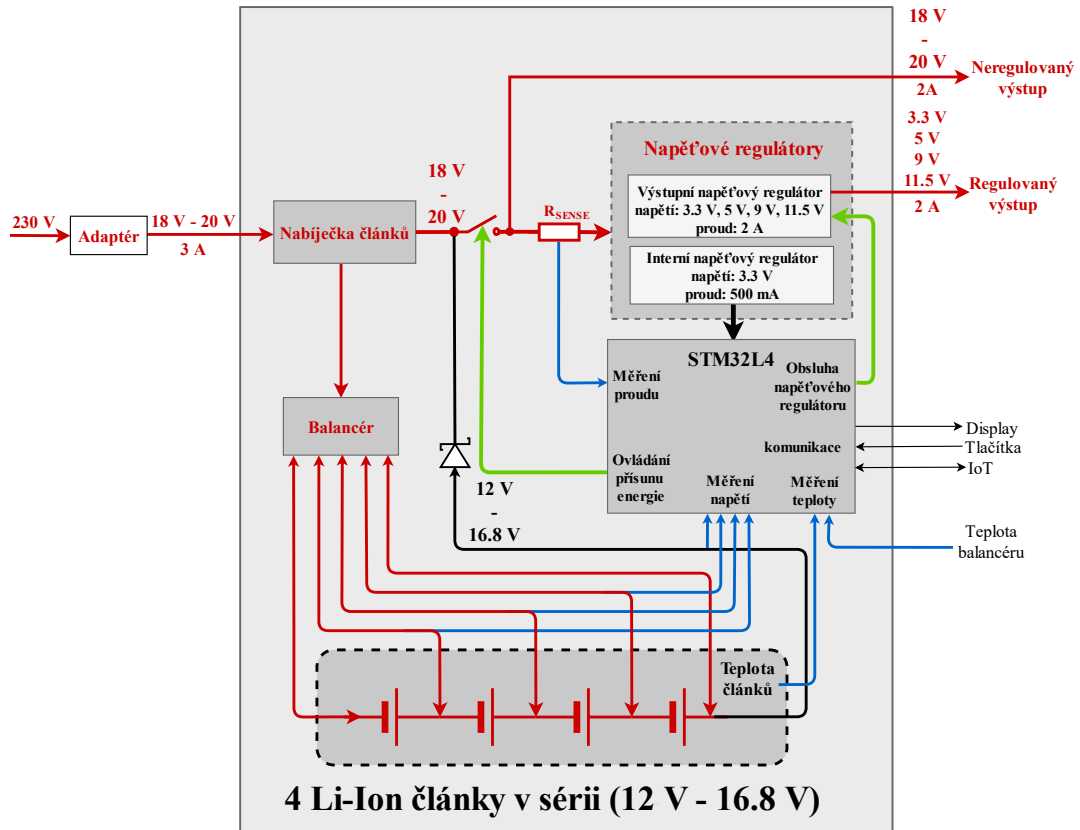
Pro představu, jak má zařízení fungovat je na Obr. 4.1 a Obr. 4.2 uvedeno zjednodušené blokové schéma, jehož jednotlivé části jsou podrobněji popsány dále v kapitole. Důvodem přítomnosti dvou blokových schémat je, že na výstup je možné dodávat energii dvěma způsoby. Červenou barvou je na nich naznačen směr tekoucího proudu, modrou barvou je označeno měření daných veličin a zelenou barvou jsou zvýrazněny prvky, které je možné ovládat pomocí mikrokontroléru.

Jedním ze způsobů, jak dodávat energii na výstup, je pomocí adaptéru. To je zachyceno na Obr. 4.1. Jak z něj lze vypočítat, při nabíjení teče proud z připojeného adaptéru do nabíječky a pomocí balancéru nabíjí články. Adaptér také dodává energii regulátorům a jak je naznačeno Schottkyho diodou, v tomto režimu není možné odebírat energii z použitých článků, ale pouze z adaptéru.

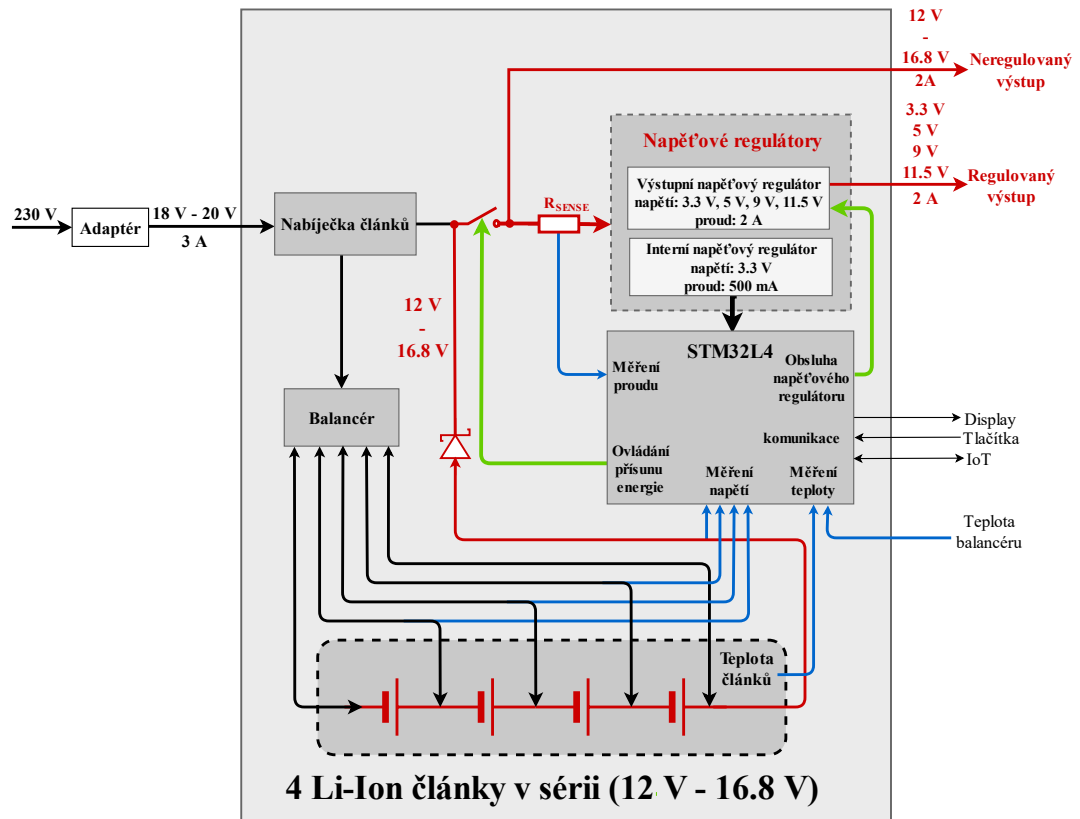
Pokud je adaptér odpojen a zařízení zapnuté, mluvíme o druhém způsobu dodávání energie na výstup, který je zachycen na Obr. 4.2. I zde je červenou barvou zvýrazněn tok energie. Jak si lze všimnout, při využívání energie z akumulátorů se balancér nevyužívá. Důvodem je úspora energie.

V obou případech je možné využít regulovaného či neregulovaného výstupu k připojení zátěže. Stav baterie je přitom monitorován mikrokontrolérem STM32L433CCT6, který by v případě potřeby rozpojil naznačený spínač a rozpojil tak obvod. Mikrokontrolér navíc prostřednictvím tlačítek a displeje zajišťuje komunikaci s okolním světem a lze s jeho pomocí nastavit výstupní napětí či zobrazit různé veličiny.

4 - Návrh druhé verze powerbanky



Obr. 4.1: Blokové schéma nabíjení



Obr. 4.2: Blokové schéma vybíjení

4.2 Použité obvody

Předmětem této podkapitoly je popis jednotlivých obvodů a vysvětlení postupu při určování okolních součástek a jejich implementaci. Označení, které odkazuje na součástku ve schématu, je možné poznat podle toho, že neobsahuje žádný index.

4.2.1 Nabíječka článků

Po zvážení různých dostupných integrovaných obvodů byl vybrán integrovaný obvod LTC4009. Jedná se o spínaný regulátor napětí, který pracuje na frekvenci 550 kHz. Pro použití v mém zařízení byly s pomocí datasheetu [27] vybrány a spočteny hodnoty okolních součástek. Část schématu zapojení je uvedena na Obr. 4.4.

Pro limitování proudu z adaptéru je podle vztahu 4.1 určena hodnota rezistoru R76

$$R76 = \frac{U_{R76}}{I_{R76}} = \frac{100 \text{ mV}}{3 \text{ A}} = 0.033 \Omega, \quad 4.1$$

kde 100 mV je maximální hodnota snímaného napětí a 3 A nastavený proud, který lze z adaptéru odebírat. Nabíjecí proud je nastaven na 2 A. Při použití několika Li-Ion článků spojených paralelně, bude nabíjení trvat sice déle, ale při použití pouze dvou paralelně zapojených akumulátorů by mohl být větší proud bateriím „smrtelem“. Z tohoto důvodu je nastaven podle vztahu 4.2 a 4.3 nabíjecí proud na 2 A.

$$R78 = \frac{U_{R78}}{I_{R78}} = \frac{100 \text{ mV}}{2 \text{ A}} = 0.05 \Omega \quad 4.2$$

$$\begin{aligned} I_{CHRG} &= \frac{R74}{R78} \left(\frac{1.2085 \text{ V}}{R74} - 11.67 \mu\text{A} \right) \\ &= \frac{3.01 \text{ k}\Omega}{0.05 \Omega} \left(\frac{1.2085 \text{ V}}{26.7 \text{ k}\Omega} - 11.67 \mu\text{A} \right) \doteq 2 \text{ A} \end{aligned} \quad 4.3$$

Protože je potřeba hluboce vybité baterie nabíjet nejprve nízkým proudem byl přidán rezistor R69. Hodnota nabíjecího proudu s využitím rezistoru R69 je ukázána v rovnici 4.4.

$$\begin{aligned} I_{CHRG} &= \frac{R74}{R78} \left(\frac{1.2085 \text{ V}}{R68 + R69} - 11.67 \mu\text{A} \right) \\ &= \frac{3.01 \text{ k}\Omega}{0.05 \Omega} \left(\frac{1.2085 \text{ V}}{26.7 \text{ k}\Omega + 53.6 \text{ k}\Omega} - 11.67 \mu\text{A} \right) \doteq 0.203 \text{ A}. \end{aligned} \quad 4.4$$

Aby bylo možné využívat nabíjecího proudu 2 A i 200 mA, byl do obvodu přidán tranzistor Q18, s jehož pomocí lze mezi režimy přepínat. Cívka potřebná ke správné funkci napěťového regulátoru byla s pomocí datasheetu zvolena s indukčností 22 μH . Pro nastavení výstupního napětí nabíječky na 16.8 V jsou hodnoty rezistorů $R72 = 271 \text{ k}\Omega$ a $R73 = 21 \text{ k}\Omega$. Pro zlepšení stability a odezvy přechodového jevu je k rezistoru připojen kondenzátor $C42 = 10 \text{ pF}$.

Další využitou funkcí nabíjecího obvodu je ochrana proti vyššímu vstupnímu napětí, a to pomocí rezistorů R65 a R66. Pokud je na pinu integrovaného obvodu LTC4009 DCDIV napětí 1.825 V, obvod detekuje vysoké napětí a přestane nabíjet články. Hodnoty rezistorů jsou $R65 = 16 \text{ k}\Omega$ a $R66 = 1.3 \text{ k}\Omega$. Podle vztahu 4.5 bylo nastaveno maximální vstupní napětí, které lze využít k nabíjení článků na 24.3 V.

4 - Návrh druhé verze powerbanky

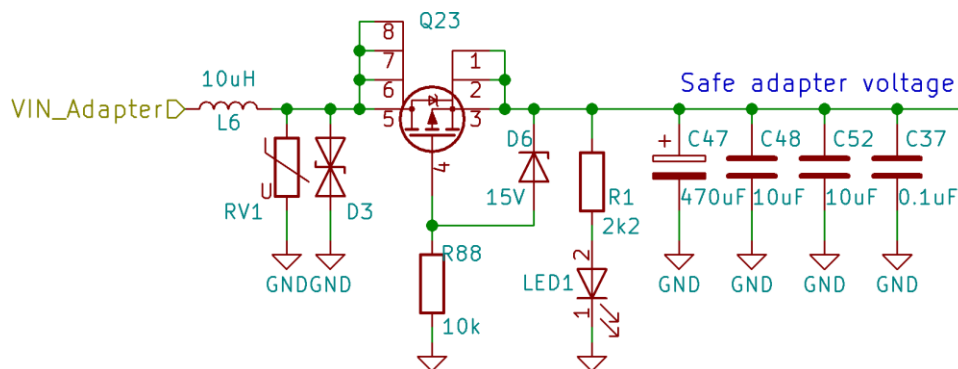
$$U_{IN\ MAX} = \frac{U_{OVP}}{\frac{R66}{R66 + R65}} = \frac{1.825\ V}{\frac{1.3\ k\Omega}{16\ k\Omega + 1.3\ k\Omega}} = 24.3\ V. \quad 4.5$$

Jelikož se v režimu napájení z adaptéru energie nevyužívá jen pro nabíjení akumulátorů, ale i pro napájení ostatních částí zařízení, je potřeba zabránit propagaci vyššího než povoleného napětí dále do obvodu. Ochranu proti vysokému napětí tedy navíc zajišťuje transil D3 spolu s varistorem RV1. Jejich zapojení je uvedeno na Obr. 4.3.

Transil zabránuje propagaci vysokého napětí dále do obvodu tím, že jím při překročení 20 V začne protékat proud. Čím větší napětí na něm je, tím větší proud jím protéká. Díky tomu „zahradí“ napěťové špičky a zabrání tak nečekanému chování či destrukci zařízení. Navíc, pokud se k zařízení připojí adaptér s větším výstupním napětím, než je povolené, dojde vlivem nárůstu protékajícího proudu transilem k rozpojení pojistky F1. Aby nebyla změna proudu příliš rychlá, je v obvodu přítomna cívka L6 s indukčností 10 μ H.

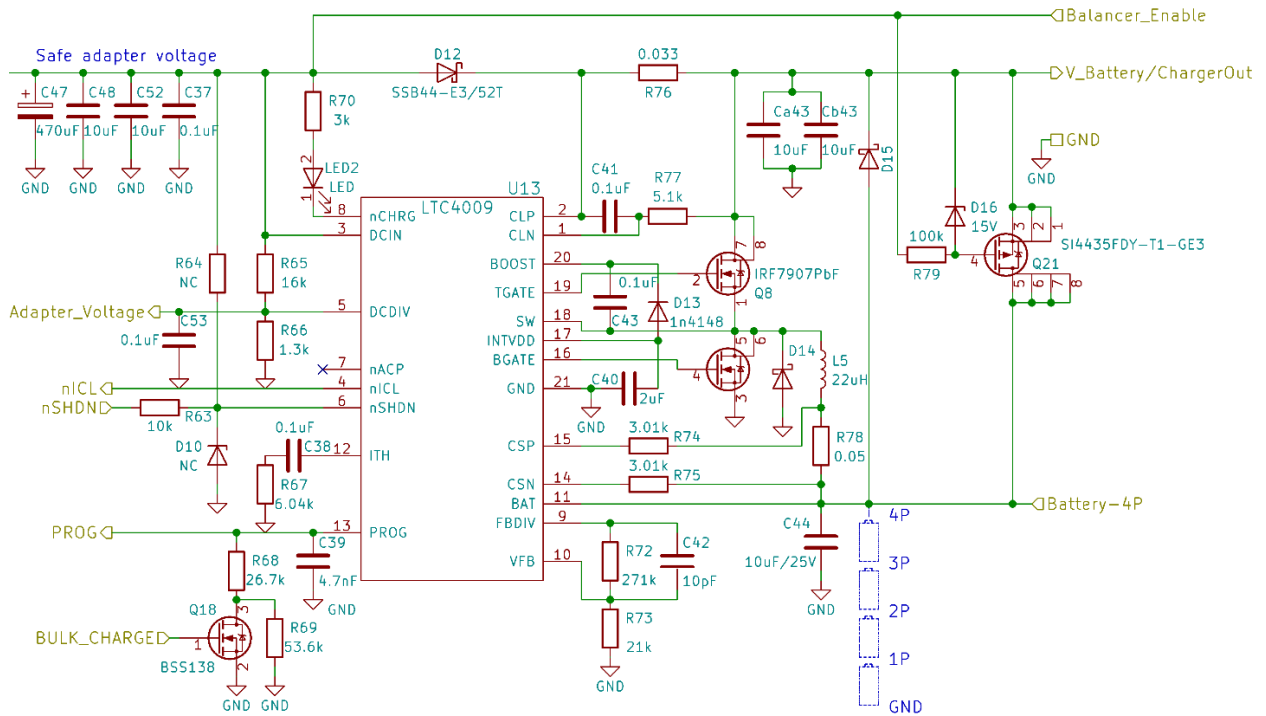
Pokud by však bylo vstupní napětí příliš vysoké a překročilo by hodnotu 27.7 V, mohlo by v případě přítomnosti „tvrdého“ zdroje dojít ke zničení transilu. Z tohoto důvodu je před transilem přítomen varistor RV1. Varistor se chová velmi podobně jako transil, ale odolá většímu proudu. Nemá však Voltampérovou charakteristiku tak „ostrou“ jako transil, je žádoucí přítomnost obou těchto součástek.

Ochrana proti přepólování zajišťuje tranzistor Q23. V případě, že bude vstupní napájení opačné polarity, zůstane tranzistor zavřený a zařízení tak bude ochráněno.



Obr. 4.3: Schéma zapojení ochranných prvků

4 - Návrh druhé verze powerbanky



Obr. 4.4: Schéma nabíjecího obvodu

4.2.2 Balancér

Použitý obvod vychází z článku publikovaného v časopise Praktická elektronika z 12. čísla roku 2017. Originální schéma bylo lehce upraveno a část použitého zapojení je uvedena na Obr. 4.5. Jsou přidány optočleny, aby byl balancér zapnutý jen v přítomnosti nabíječky. Protože je žádoucí, aby byl navržený obvod co nejméně ovlivňován, bylo třeba volit takové optočleny, které co nejméně ovlivňují správnou funkci. K takovému účelu je vhodný například optočlen VO1400AEF [28], jejichž spínací část má v sepnutém stavu rezistenci okolo 2.7 Ω.

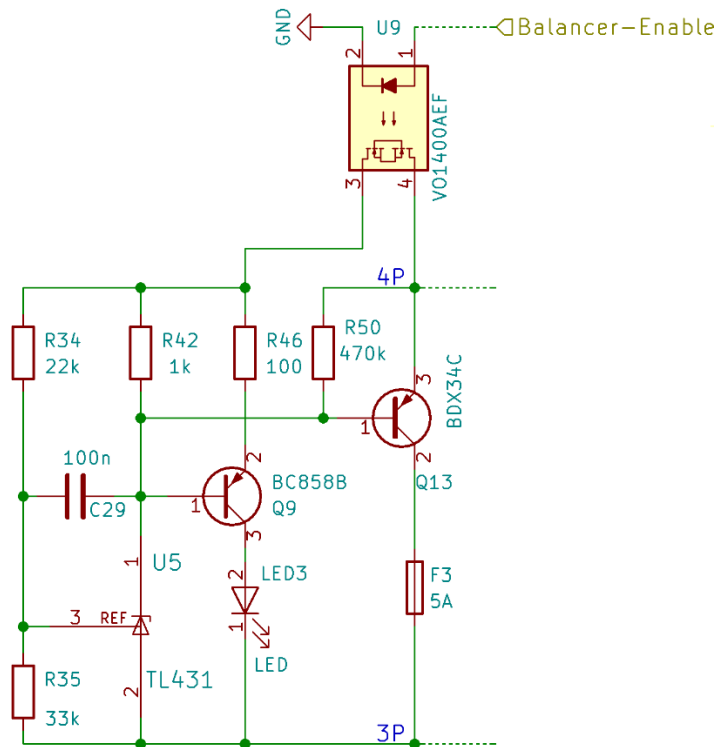
Část optočlenu s LED je napájena z adaptéru napětím 18 V - 20 V. Pro dostatečné otevření tranzistorů byl zvolen proud 15 mA, který podle vztahu 4.6 zajišťuje rezistor $R54 = 1300 \Omega$.

$$R54 = \frac{U_{\text{napájení}} - U_{\text{úbytek na LED}}}{I_{\text{požadovaný}}} = \frac{20 \text{ V} - 4 \cdot 1.2 \text{ V}}{0.015 \text{ mA}} = 1013 \Omega \quad 4.6$$

Pro případ, že by výkonovým tranzistorem protékal příliš velký proud, je u každého z nich pojistka, která v případě překročení proudu 5 A obvod rozpojí.

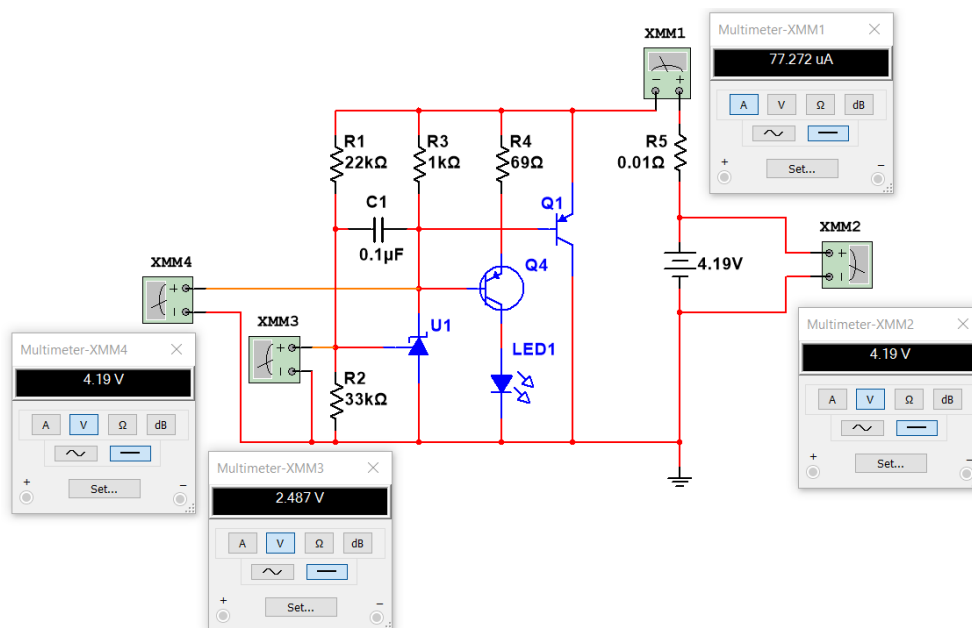
Tranzistor Q9 je zde pro spínání LED, aby bylo možné zjistit, zda balancér pracuje.

4 - Návrh druhé verze powerbanky



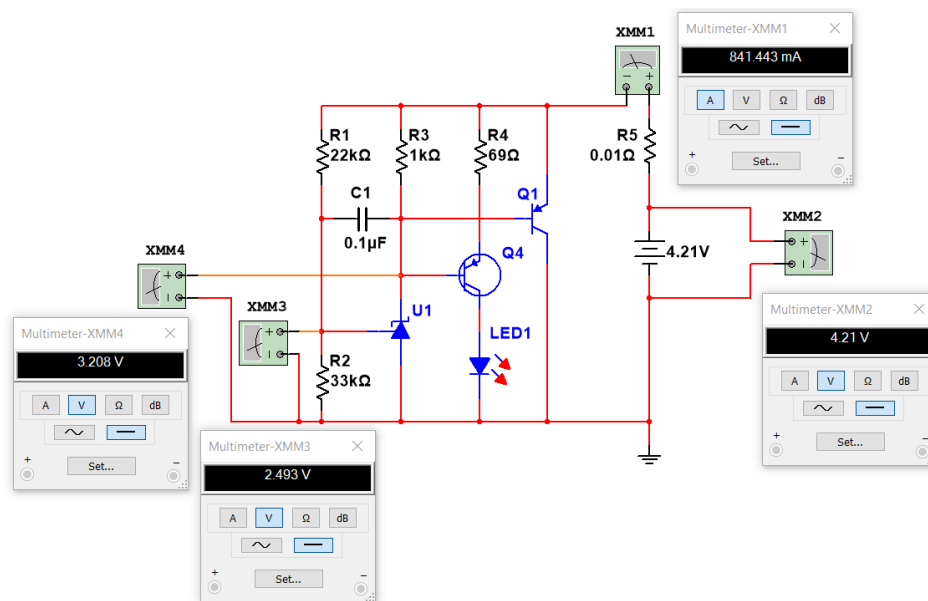
Obr. 4.5: Část schématu ukazující jeden stupeň balancéru

Velmi podstatnou součástí je zde napěťová reference TL431. V tomto zapojení funguje tak, že při dosažení napětí 2.495 V na referenčním pinu dojde k otevření naznačené Zenerovy diody. Toto referenční napětí je pomocí rezistorů R34 a R35 nastaveno tak, aby se Zenerova dioda dostatečně otevřela při nárůstu napětí na člancích nad hodnotu 4.2 V. Jak je vidět na simulaci na Obr. 4.6, tak v případě napětí menšího, než je 4.2 V je na bázích tranzistorů označených Q4 a Q1 stejné napětí jako na jejich emitoru a jsou tedy zavřené. Obr. 4.7 ukazuje, že při zvýšení napětí přes 4.2 V začne vlivem nárůstu napětí na referenci TL431 docházet k otevírání Zenerovy diody, což vede k poklesu napětí na bázi zmíněných tranzistorů, a tedy k jejich otevření.



Obr. 4.6: Simulace jednoho stupně balancéru (Vytvořeno v programu Multisim)

4 - Návrh druhé verze powerbanky



Obr. 4.7: Simulace jednoho stupně balancéru (Vytvořeno v programu Multisim)

4.2.3 Výstupní měnič napětí

Při výběru výstupního napětíového regulátoru byly hlavními požadavky maximální velikost odebíraného proudu až 2 A, možnost nastavení výstupního napětí na hodnotu okolo 11 V a co nejvyšší efektivita. Po zvážení několika možností byl vybrán integrovaný obvod LMR14020-Q1 [29] od firmy Texas Instruments, jehož schéma zapojení, na kterém lze najít níže popisované součástky, je zachyceno na Obr. 4.8. Tento obvod splňuje všechny požadavky, a navíc disponuje možností nastavení spínací frekvence.

Spínací frekvence je nastavena pomocí rezistoru R25 podle vztahu 4.7 přibližně na $f_{SW} = 1.5 \text{ MHz}$.

$$f_{SW} = \left(\frac{R25 \text{ k}\Omega}{42904}\right)^{-1.088} = \left(\frac{15}{42904}\right)^{-1.088} = 1502.6 \text{ kHz} \quad 4.7$$

V případě potřeby jiné frekvence je možné nastavení pomocí použitého mikrokontroléru, případně pomocí konektoru J7.

Dalším důležitým parametrem, který bylo třeba určit, je kapacita vstupního kondenzátoru. Tato hodnota byla vypočítána s využitím vztahu 4.8, ve kterém I je proud dodávaný kondenzátorem po dobu Δt , při uvažovaném poklesu napětí o ΔU . Jelikož maximální výstupní proud nepřesahuje 2 A, tak uvažovaný proud v rovnici 4.8 bude z důvodu poměrně vysoké účinnosti ještě menší. Navíc jsou na vstupu 2 paralelně spojené kondenzátory s kapacitou $4.7 \mu\text{F}$ a celková vstupní kapacita je potom $9.4 \mu\text{F}$. Změna napětí na vstupu, která by mohla rušit okolní obvody, je tedy značně menší.

$$C_{IN} = \frac{I \cdot \Delta t}{\Delta U} = \frac{2 \text{ A} \cdot \frac{1}{1.5 \text{ MHz}}}{150 \text{ mV}} \doteq 8.88 \mu\text{F} \quad 4.8$$

Podobným způsobem byla určena i kapacita výstupního kondenzátoru. Z důvodu požadavku co nejmenšího zvlnění, rozumné ceny a teplotní stability jsou na výstupu 3 paralelně spojené kondenzátory s kapacitou $22 \mu\text{F}$ s dielektrikem X7R a nízkou hodnotou ESR¹¹.

¹¹ Equivalent series resistance

4 - Návrh druhé verze powerbanky

Navíc je za výstupním kondenzátorem přítomný LC filtr, který díky dostatečně vzdálené rezonanční frekvenci od pracovní frekvence regulátoru také potlačuje zvlnění a zajišťuje tak kvalitu výstupního napětí. Výpočet LC filtru je popsán v rovnici 4.9.

$$f_{\text{rezonanční}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{10\ \mu\text{H} \cdot 22\ \mu\text{F}}} = 10.730\ \text{kHz} \quad 4.9$$

Dále bylo při návrhu zapojení využito ochrany proti podpětí, což je učiněno pomocí rezistorů R21 a R22 podle vztahu 4.10

$$U_{EN} = U_{VIN} \frac{R22}{R21 + R22} = 10\ \text{V} \frac{100\ \text{k}\Omega}{100\ \text{k}\Omega + 732\ \text{k}\Omega} \doteq 1.2\ \text{V}, \quad 4.10$$

kde U_{VIN} je napětí článků případně připojeného adaptéru a U_{EN} napětí určující, zda je integrovaný obvod v provozu. Napěťový regulátor spíná pouze při napětí U_{EN} vyšším než 1.2 V a při poklesu U_{VIN} pod 10 V se sám vypne. Také je možné jej vypnout tranzistorem Q22, který při otevření „uzemní“ pin EN.

Indukčnost cívky byla určena podle vztahu 4.11, kde největší minimální indukčnost při uvažování i případných napěťových špiček do $U_{IN\ MAX} = 24\ \text{V}$ pro výstupní napětí $U_{OUT} = 11.5$ vychází $L_{MIN} = 6.7\ \mu\text{H}$.

$$L_{MIN} = \frac{U_{IN\ MAX} - U_{OUT}}{I_{OUT} \cdot 0.4} \cdot \frac{U_{OUT}}{U_{IN\ MAX} \cdot f_{SW}} = \frac{24 - 11.5}{2 \cdot 0.3} \cdot \frac{11.5}{24 \cdot 1.5\ \text{MHz}} = 6.7\ \mu\text{H} \quad 4.11$$

Aby bylo možné využívat i nižších frekvencí, byla zvolena cívka s indukčností 10 μH . Tato indukčnost dovoluje snížit frekvenci až na 1 MHz. Pokud by bylo potřeba snížit spínací frekvenci pod 1 MHz, je nutné indukčnost cívky zvýšit.

Výstupní napětí je nastaveno podle vztahu

$$U_{OUT} = 0.75 \cdot \frac{R26 + R_X}{R_X}, \quad 4.12$$

kde R_X představuje rezistor R27 nebo s ním paralelně spojený jeden z rezistorů R28, R30, R32, které lze využít otevřením tranzistorů Q3, Q6 či Q7.

Rovnice 4.13 až 4.16 ukazují hodnoty výstupního napětí pro použité kombinace paralelně spojených rezistorů.

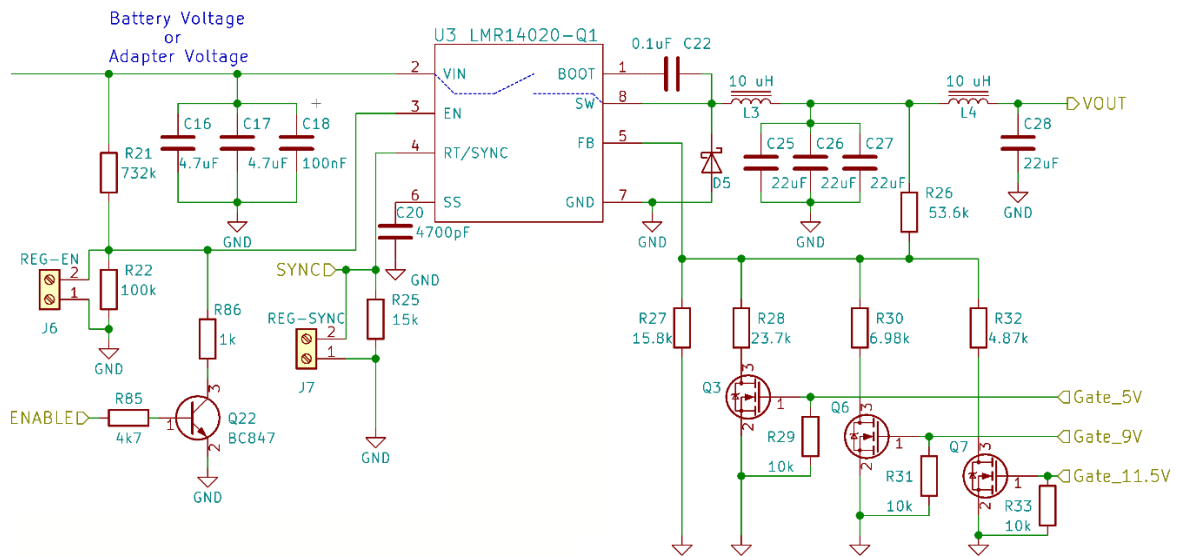
$$U_{3.3\ \text{V}} = 0.75 \cdot \frac{R26 + R27}{R27} \doteq 3.3\ \text{V} \quad 4.13$$

$$U_{5\ \text{V}} = 0.75 \cdot \frac{R26 + \frac{R27 \cdot R28}{R27 + R28}}{\frac{R27 \cdot R28}{R27 + R28}} \doteq 5\ \text{V} \quad 4.14$$

$$U_{9\ \text{V}} = 0.75 \cdot \frac{R26 + \frac{R27 \cdot R30}{R27 + R30}}{\frac{R27 \cdot R30}{R27 + R30}} \doteq 9\ \text{V} \quad 4.15$$

$$U_{11.5\ \text{V}} = 0.75 \cdot \frac{R26 + \frac{R27 \cdot R32}{R27 + R32}}{\frac{R27 \cdot R32}{R27 + R32}} \approx 11.5\ \text{V} \quad 4.16$$

4 - Návrh druhé verze powerbanky



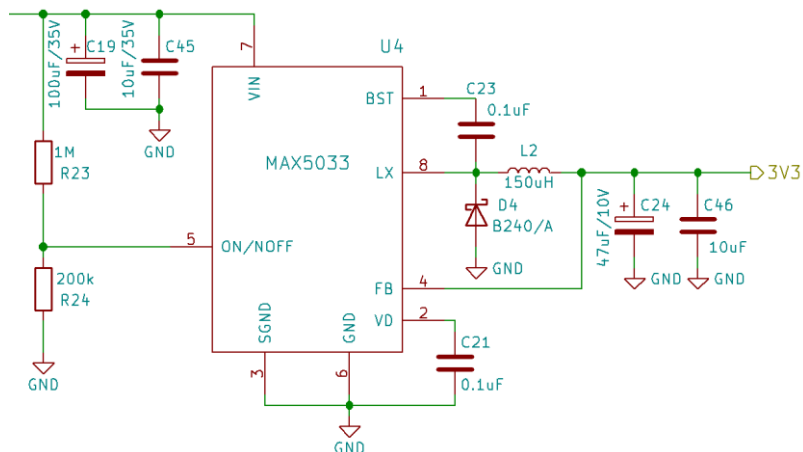
Obr. 4.8: Schéma výstupního napěťového regulátoru

4.2.4 Interní měnič napětí

Interní měnič napětí má za úkol zajistit napájení použitého mikrokontroléru a jeho periférií pomocí napětí 3.3 V. Mohl by se použít pouze lineární napěťový stabilizátor, protože potřebný proud by měl být přibližně 50 mA, ale z důvodu co největší účinnosti byl použit spínaný stabilizátor MAX5033, který dosahuje efektivity až 94 % [30]. Jeho schéma zapojení je uvedeno na Obr. 4.9.

Podle datasheetu byla zvolena cívka s indukčností 150 μH , Schottkyho dioda, vstupní kondenzátor s kapacitou 100 μF a výstupní kondenzátor s kapacitou 47 μF . Pro lepší funkčnost byly přidány keramické kondenzátory s kapacitou 10 μF ke vstupnímu i výstupnímu elektrolytickému kondenzátoru. I u tohoto regulátoru je využito ochrany proti podpětí. K vypnutí dojde při poklesu napětí $U_{ON/OFF}$ pod 1.69 V. Podle vztahu 4.17 jsou určeny hodnoty rezistorů $R_{23} = 1 \text{ M}\Omega$ a $R_{24} = 200 \text{ k}\Omega$, díky kterým obvod přestane spínat přibližně při napětí nižším než 10.15 V.

$$U_{ON/OFF} = U_{VIN} \frac{R_{24}}{R_{24} + R_{23}} = 10.15 \text{ V} \cdot \frac{200 \text{ k}\Omega}{200 \text{ k}\Omega + 1 \text{ M}\Omega} \doteq 1.69 \text{ V} \quad 4.17$$



Obr. 4.9: Schéma vnitřního napěťového regulátoru

4.2.5 Řídící mikrokontrolér

Při volbě řídicího mikrokontroléru byly hlavními požadavky nízká spotřeba, přijatelná cena a dostatečný počet pinů. To splňují 32-bitové mikrokontroléry ARM od firmy STMicroelectronics řady L4. Dostatečně vybaveným mikrokontrolérem pro popisované zařízení z této řady je STM32L433CCT6. Účely jednotlivých pinů jsou popsány v tabulkách Tab. 4.1 až Tab. 4.4.

Ke správné funkčnosti mikrokontroléru jsou u jeho napájecích pinů umístěny blokovací kondenzátory, které dodají potřebnou energii v krátké době. Mezi napájením digitální a analogové části mikrokontroléru je umístěna feritová perla, která spolu s blokovacím kondenzátorem zajišťuje stabilní napájení pro analogovou část.

Dále jsou k integrovanému obvodu připojeny 2 krystaly. Jeden s frekvencí 8 MHz, který zajišťuje ve srovnání s RC oscilátorem uvnitř mikrokontroléru přesnou taktovací frekvenci. Druhý krystal s frekvencí $2^{15} \text{ Hz} = 32.768 \text{ kHz}$ zajišťuje frekvenci pro hodiny reálného času.

Pro funkčnost hodin reálného času i bez připojeného napájení umožňuje mikrokontrolér připojení externí baterie, čehož bylo v tomto projektu také využito. K baterii je připojen kondenzátor pro případ špatného kontaktu baterie s konektory.

Pomocí rezistoru R18 je mikrokontrolér nakonfigurován tak, aby vykonávané instrukce četl ze své flash paměti [31].

Analogové vstupy		
Pin mikrokontroléru	Název ve schématu	Funkce
PA0	PA0-ADC_4P	Měří napětí 4. článku 1.446 V: vybitý článek 2.024 V: nabitý článek
PA1	PA1-ADC_3P	Měří napětí 3. článku 1.418 V: vybitý článek 1.985 V: nabitý článek
PA2	PA2-ADC_2P	Měří napětí 2. článku 1.416 V: vybitý článek 1.983 V: nabitý článek
PA3	PA3-ADC_1P	Měří napětí 1. článku 1.428 V: vybitý článek 2.000 V: nabitý článek
PA4	PA4-ADC_NTC1	Měří teplotu akumulátoru Beta faktor: 3977 K
PA5	PA5-ADC_NTC2	Měří teplotu balancéru Beta faktor: 3977 K
PA6	PA6-ADC_Adapter_Voltage	Měří napětí adaptéru 0 V: odpojený adaptér 1.825V: příliš vysoké napětí
PA7	PA7-ADC_Charger-PROG	Měří napětí určující nabíjecí proud 1.2085 V: nabíjecí proud 2 A / 0.2 A 0 V: nabíjecí proud 0 A
PB0	PB0-ADC_CS+, PB0-ADC_CS-	Měří napětí určující vybíjecí proud 1.98 V: vybíjecí proud 3 A 0 V: vybíjecí proud 0 A

Tab. 4.1: Seznam analogových vstupů použitého mikrokontroléru

4 - Návrh druhé verze powerbanky

Digitální vstupy		
Pin mikrokontroléru	Název ve schématu	Funkce
PA15	PA15-GPI_Button0	Říká stav tlačítka 1 L: tlačítko je stisknuté H: tlačítko není stisknuté
PB1	PB1-GPI_Button1	Říká stav tlačítka 2 L: tlačítko je stisknuté H: tlačítko není stisknuté
PB2	PB2-GPI_Button2	Říká stav tlačítka 3 L: tlačítko je stisknuté H: tlačítko není stisknuté
PB8	PB8-GPI_Charger-nICL	Říká, zda je nabíjecí proud dostatečně velký L: adaptér neposkytuje dostatečně velký proud H: adaptér poskytuje dostatečně velký proud

Tab. 4.2: Seznam digitálních vstupů použitého mikrokontroléru

Digitální výstupy		
Pin mikrokontroléru	Název ve schématu	Funkce
PA8	PA8-GPO_LCD-CS0	Zapíná komunikaci s LCD L: komunikace s LCD je aktivní H: komunikace s LCD není aktivní
PA9	PA9-GPO_LCD-RST	Resetuje LCD L: reset je aktivní H: reset není aktivní
PA10	PA10-GPO_LCD-CD	Přepíná mezi daty a intrukcemi pro LCD L: vysílají se instrukce H: vysílají se data
PA11	PA11-GPO_BuckC-Enable	Zapíná výstupní napěťový regulátoru L: výstupní napěťový regulátor je zapnutý H: výstupní napěťový regulátor je vypnutý
PA12	PA12-GPO_Power-FET-HoldON	Udrží zařízení v zapnutém stavu L: Zařízení se vypne H: Zařízení zůstane v zapnutém stavu
PB3	PB3-GPO_BuckC-5V	Nastavuje výstupní napětí na 5 V L: neovlivní výstupní napěťový regulátor H: nastaví napětí výstupního regulátoru na 5 V
PB4	PB4-GPO_BuckC-9V	Nastavuje výstupní napětí na 9 V L: neovlivní výstupní napěťový regulátor H: nastaví napětí výstupního regulátoru na 9 V
PB5	PB5-GPO_BuckC-11.5V	Nastavuje výstupní napětí na 11.5 V L: neovlivní výstupní napěťový regulátor H: nastaví napětí výstupního regulátoru na 11.5 V
PB7	PB7-GPO_Charger-FET-BULK	Přepíná mezi nabíjecími režimy L: maximální nabíjecí proud je 0.2 A H: maximální nabíjecí proud je 2 A
PB9	PB9-GPO_Charger-nSHDN	Vypíná nabíjecí obvod L: nabíjecí obvod se vypne H: nabíjecí obvod zůstane zapnutý
PB12	PB12-GPO_IoT-Fet-Enable	Zapíná modul IoT L: modul IoT je zapnutý H: modul IoT je vypnutý
PB14	PB14-GPO_LCD-Backlight	Zapíná podsvícení LCD L: podsvícení je vypnuté H: podsvícení je zapnuté

Tab. 4.3: Seznam digitálních výstupů použitého mikrokontroléru

4 - Návrh druhé verze powerbanky

Ostatní piny		
Pin mikrokontroléru	Název ve schématu	Funkce
PA13	PA13-SWDIO	Slouží k programování mikrokontroléru
PA14	PA14-SWCLK	Slouží k programování mikrokontroléru
PB6	PB6-Timer_SYNC	Nastavuje frekvenci výstupního napěťového regulátoru
PB10	PB10-USART3-TX_IoT	Slouží ke komunikaci s modulem IoT
PB11	PB11-USART3-RX_IoT	Slouží ke komunikaci s modulem IoT
PB13	PB13-SPI2-SCK_LCD	Slouží ke komunikaci s LCD
PB15	PB15-SPI2-MOSI_LCD	Slouží ke komunikaci s LCD

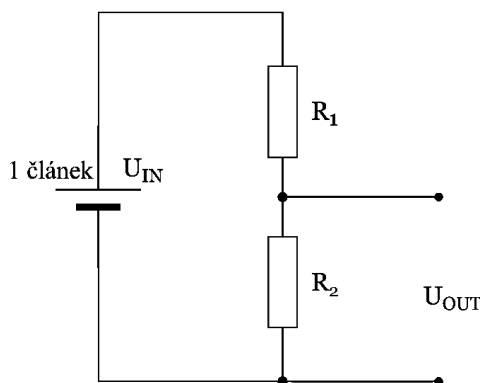
Tab. 4.4: Seznam ostatních pinů použitého mikrokontroléru

4.2.5.1 Měření napětí na jednotlivých článcích

Jak již bylo zmíněno, k obsluhování Lithium-Iontových baterií je třeba měřit jejich napětí. K měření napětí na všech čtyřech článcích bylo využito odporových děličů, pomocí kterých je napětí sníženo na bezpečnou hodnotu, kterou lze pomocí AD převodníku měřit. Hodnoty odporů děliče byly zvoleny podle vztahu 4.18 tak, aby výstupní napětí při nabitých článcích bylo okolo 2 V. Na Obr. 4.10 je pro názornost uvedeno jejich zapojení.

$$U_{OUT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{IN}, \quad 4.18$$

Rezistoru R_1 odpovídají ve schématu zapojení na Obr. 4.11 rezistory R55, R57, R59, R61 a rezistoru R_2 odpovídají R56, R58, R60, R62. Vztah mezi snímaným napětím, jeho rozlišením a napětím článků zachycuje Tab. 4.5.



Obr. 4.10: Schéma napěťového děliče

	Reálné napětí	Snímané napětí odpovídající vybitému článku (3 V)	Snímané napětí odpovídající nabitému článku (4.2 V)	Rozlišení snímaného napětí
1. článek	3 V – 4.2 V	1.446 V	2.024 V	1.2 mV/dílek
2. článek	6 V – 8.4 V	1.418 V	1.985 V	0.8 mV/dílek
3. článek	9 V – 12.6 V	1.416 V	1.983 V	0.6 mV/dílek
4. článek	12 V – 16.8 V	1.428 V	2.000 V	0.3 mV/dílek

Tab. 4.5: Vztah mezi snímaným napětím, rozlišením a napětím článků

Rozlišení je dáno podle vztahu 4.19.

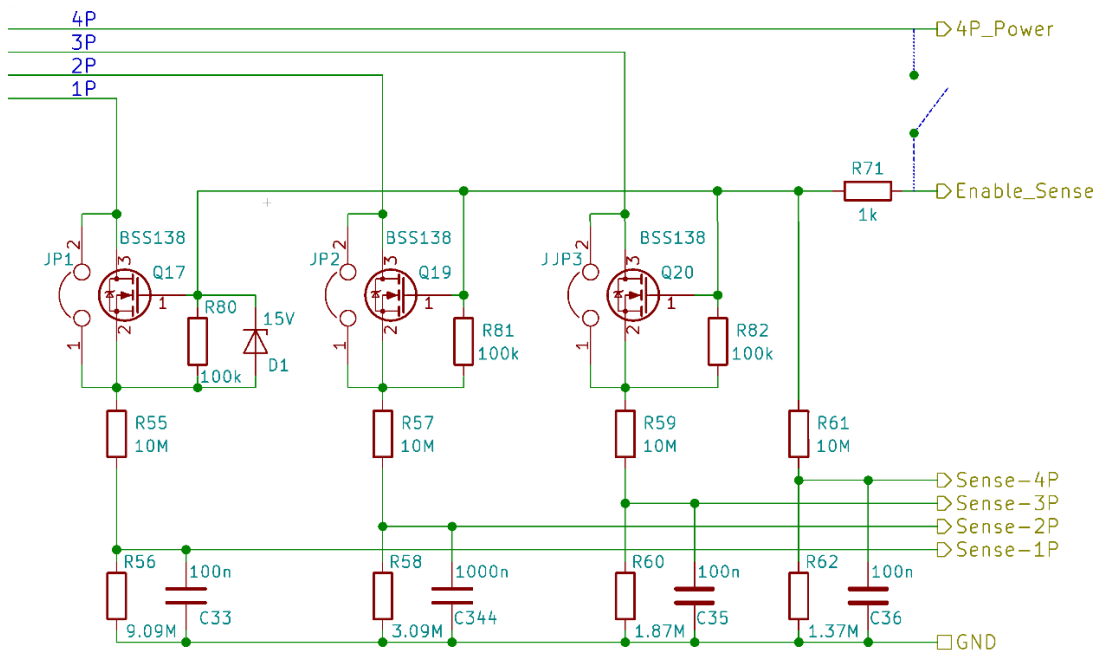
$$\text{rozlišení} = \frac{U_{IN\ MAX} - U_{IN\ MIN}}{2^{12}} \quad 4.19$$

4 - Návrh druhé verze powerbanky

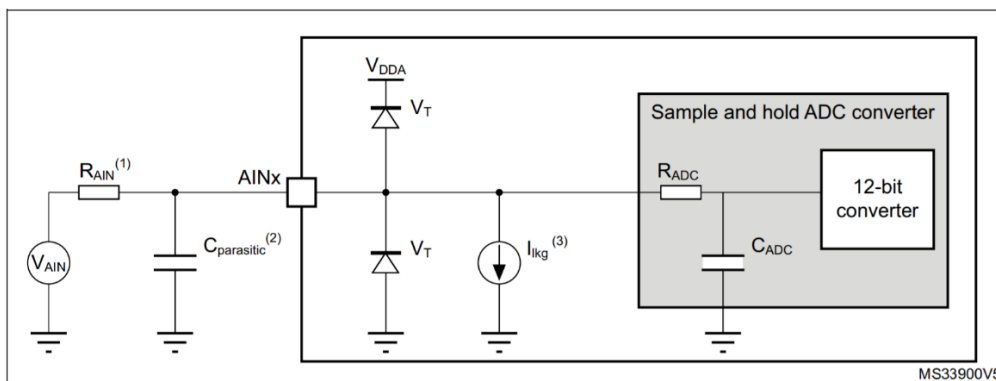
Tedy například pro první články je výpočet

$$\text{rozlišení}_{1P} = \frac{U_{IN\ MAX} - U_{IN\ MIN}}{2^{12}} = \frac{4.2\ V - 3\ V}{4096} \doteq 0.3\ mV. \quad 4.20$$

U odporových děličů (Obr. 4.11) jsou přítomny i další součástky. Kondenzátory C33, C34, C35 a C36 slouží k udržení výstupního napětí děliče, jelikož zatížení AD převodníkem by mělo za následek pokles napětí na děliči. Důvodem použití tranzistorů Q17, Q19 a Q20 je, aby zabránily zapínání mikrokontroléru a zbytečnému vybíjení článků, pokud je zařízení vypnuté. Jak je ukázáno na Obr. 4.12, uvnitř mikrokontroléru jsou ochranné diody a skrze diodu mezi snímacím pinem a napájením by mohlo dojít k nechtěnému zapnutí mikrokontroléru. Naznačený spínač (ve schématu Q2) mezi piny *4P_Power* a *Enable_Sense* ukazuje možnost vypnutí měření napětí na článcích. Pokud je tento spínač sepnutý a není připojený adaptér, je na pinu *Enable sense* napětí článků. Tranzistory Q17, Q19, Q20 jsou v tomto případě zapnuté a je možné měřit napětí na článcích. Pokud je však připojený adaptér, pak navzdory naznačenému spínači je napětí na pinu *Enable sense* rovno napětí adaptéru. Protože by napětí adaptéru mohlo dosahovat nebezpečného napětí pro tranzistor Q17, je zde přítomna Zenerova dioda D1.



Obr. 4.11: Schéma zapojení obvodu měřícího napětí článků



Obr. 4.12: Typické zapojení využívající analogově digitálního převodníku (Převzato z [32])

4.2.5.2 Měření proudu

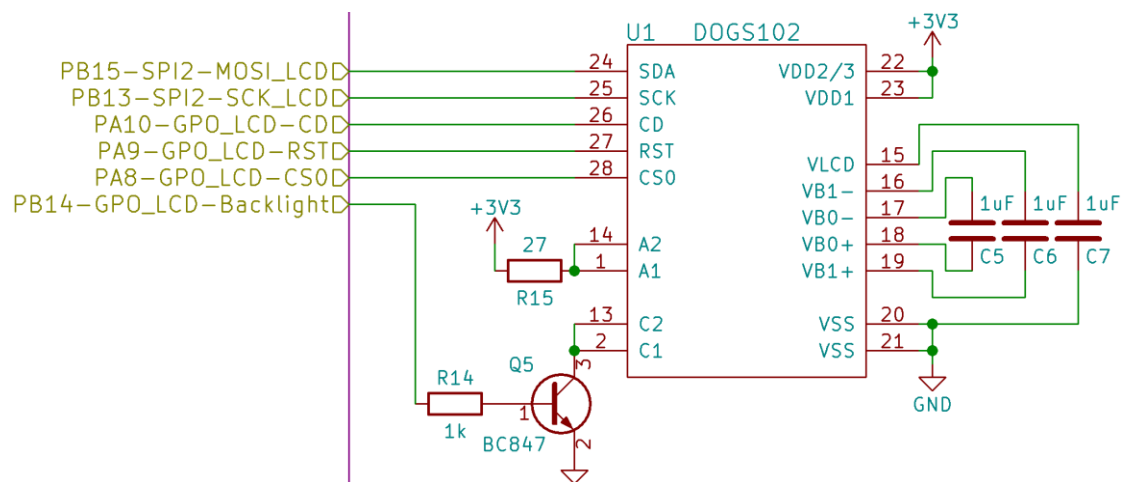
Hodnotu nabíjecího proudu mikrokontrolér zjišťuje přímo od nabíjecího obvodu. Podle doporučení z datasheetu je použit napěťový sledovač, díky kterému je funkce nabíjecího obvodu minimálně ovlivňována. K realizaci napěťového sledovače jsem využil operační zesilovač od firmy Microchip MCP6001 [33]. Pro přesnější měření je umístěn v blízkosti mikrokontroléru kondenzátor. Pokud by byl kondenzátor vybitý, měl by operační zesilovač snahu dobít jej vysokým proudem, a tak je proud omezen rezistorem 1 k Ω .

Vybíjecí proud je měřen s pomocí integrovaného obvodu INA181A1. Uvnitř je zapojení s operačním zesilovačem, které 20 \times zvětší vstupní napětí. K převedení proudu na napětí je využito měření úbytku napětí na rezistoru R8 s odporem 33 m Ω . Proud 2 A odpovídá napětí $2 A \cdot 0.033 \Omega \cdot 20 = 1.32 V$ [34].

4.2.6 LCD

Zobrazovacím prvkem byl zvolen nízkopříkonový grafický displej od firmy Electronic Assembly DOGS102 s rozlišením 102x64 pixelů. Displej je ovládán pomocí řadiče UC1701, se kterým lze komunikovat po sběrnici SPI. Displej je napájen 3.3 V a jeho spotřeba se pohybuje okolo 250 μA [35]. K LCD je externě připojeno podsvícení, které je rovněž napájeno 3.3 V. Spotřeba podsvícení je pomocí rezistoru R15 nastavena na 33 mA, jak je ukázáno na vztahu 4.21. Jeho zapojení je znázorněno na Obr. 4.13. O práci s tímto displejem pojednává kapitola 6.

$$I_{LCD} = \frac{V_{REF} - U_{LED} - U_{tran}}{R15} = \frac{3.3 V - 2.2 V - 0.2 V}{27 \Omega} \doteq 33 mA \quad 4.21$$

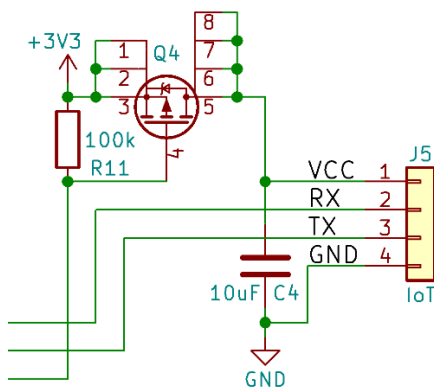


Obr. 4.13: Schéma zapojení displeje

4.2.7 IoT

K připojení externího modulu zajišťujícího komunikaci slouží konektor J5. Aby bylo možné použití i jiného modulu než nízkopříkonového, je v blízkosti tohoto konektoru kondenzátor C4 s kapacitou 10 μF a nízkou hodnotou ESR. Tranzistor Q4 umožňuje podle potřeby modul vypnout či zapnout. Zapojení je uvedeno na Obr. 4.14.

4 - Návrh druhé verze powerbanky



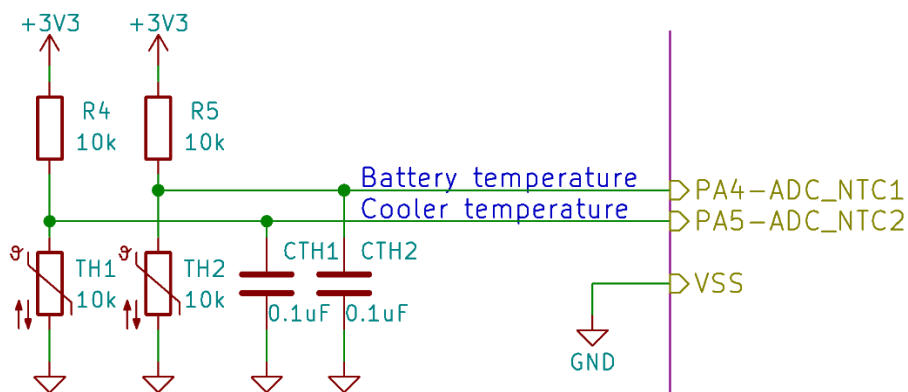
Obr. 4.14: Schéma zapojení konektoru pro IoT modul

4.2.8 Měření teploty

Při nabíjení článků a jejich používání je důležité, abychom znali jejich teplotu. Díky této znalosti můžeme v případě nějakého problému zajistit jejich včasné odpojení, případně vypnutí nabíjecího obvodu a zabránit tak možným problémům.

Dále je měřena teplota chladiče výkonových tranzistorů balancéru. Případ jeho vysoké teploty poukazuje na velké rozdíly sériově připojených článků.

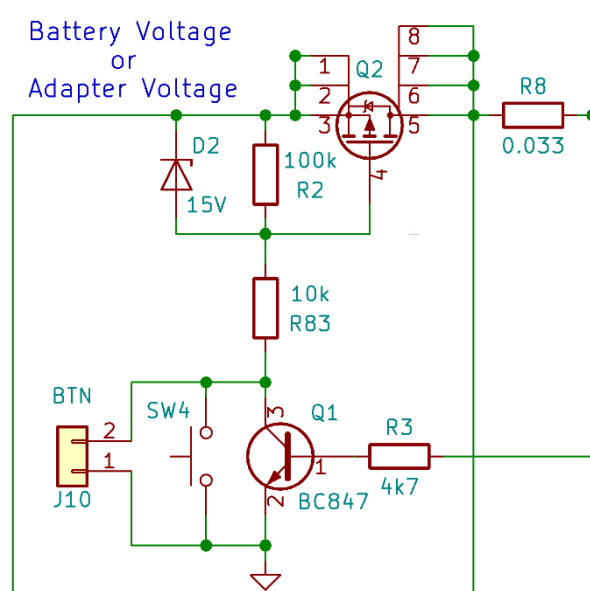
Pro tyto účely byly zvoleny měřicími prvky NTC termistory s odporem $10\text{ k}\Omega$ a beta faktorem 3977 K . Jejich zapojení je uvedeno na obrázku Obr. 4.15



Obr. 4.15: Schéma zapojení měření teploty

4.2.9 Zapínání zařízení

Část schématu zajišťující zapínání powerbanky je uvedena na Obr. 4.16. Tlačítko SW4 a konektor J10 slouží k možnosti změny stavu tranzistoru Q2. Sepnutím tohoto tranzistoru dojde k zapnutí mikrokontroléru, který dále udržuje Q2 v sepnutém stavu s pomocí tranzistoru Q1.

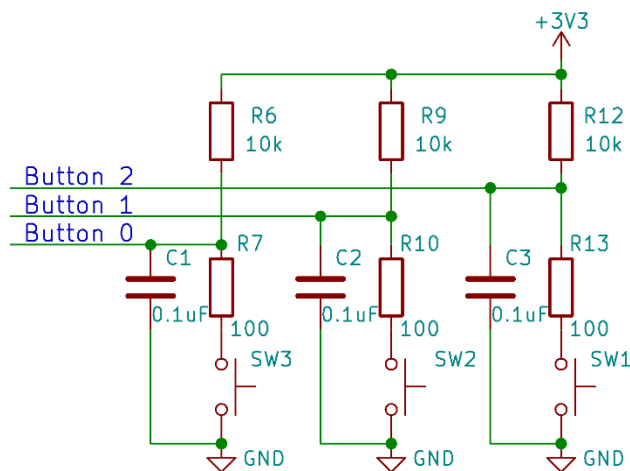


Obr. 4.16: Schéma zapojení zapínacího obvodu

4.2.10 Uživatelská tlačítka

Spínače, jejichž úroveň je detekována s pomocí mikrokontroléru jsou zapojené podle Obr. 4.17. Tlačítka jsou tedy zapojena tak, že pokud mikrokontrolér detekuje úroveň logické 1, jsou spínače rozepnuté. V opačném případě jsou spínače sepnuté.

Kondenzátory C1, C2 a C3 sloužící k potlačení záchvěvu a ke snížení jejich vybíjecího proudu jsou zde rezistory R7, R10 a R13.



Obr. 4.17: Schéma zapojení uživatelských tlačítek

5 Návrh DPS druhé verze powerbanky

V této kapitole je popsán postup, který jsem použil při návrhu DPS. Kladl jsem důraz zejména na potlačení indukčního charakteru propojovacích cest a minimalizaci proudových smyček.

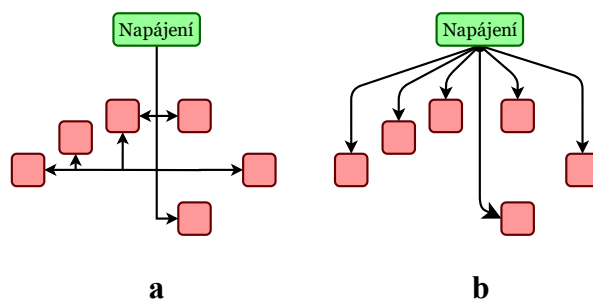
5.1 Potlačení indukčního charakteru spojových cest

Potlačení indukčního charakteru jsem při návrhu realizoval především rozumným spojováním cest a rozmístěním součástek. U návrhu je třeba počítat s tím, že propojovací cesty nejsou dokonalým vodičem a mají indukční charakter.

Uvažujme například, že vedeme napájení po cestě dlouhé 10 cm. Uvažujme, že její indukčnost je 100 nH a jí protékající proud by se měl změnit za 10 nanosekund o 500 mA. Pak by podle vztahu 5.1 došlo ke snížení napětí o 5 V.

$$U_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -100 \text{ nH} \cdot \frac{500 \text{ mA}}{10 \text{ ns}} = -5V \quad 5.1$$

Tím by mohlo v případě zapojení napájení podle Obr. 5.1. a dojít k poklesu napětí pro více než jeden obvod. Z tohoto důvodu jsem se snažil napájení vést podle Obr. 5.1. b



Obr. 5.1: Možnosti připojení napájení (a – špatně, b – správně)
(zelený blok značí napájení, červený blok napájený obvod)

U všech kritičtějším obvodů jsou přítomny blokovací kondenzátory, které zajišťují včasné poskytnutí energie obvodu a zabrání poklesu napětí na vedení. Jejich umístění bylo voleno vždy co nejbližší k napájení daných obvodů.

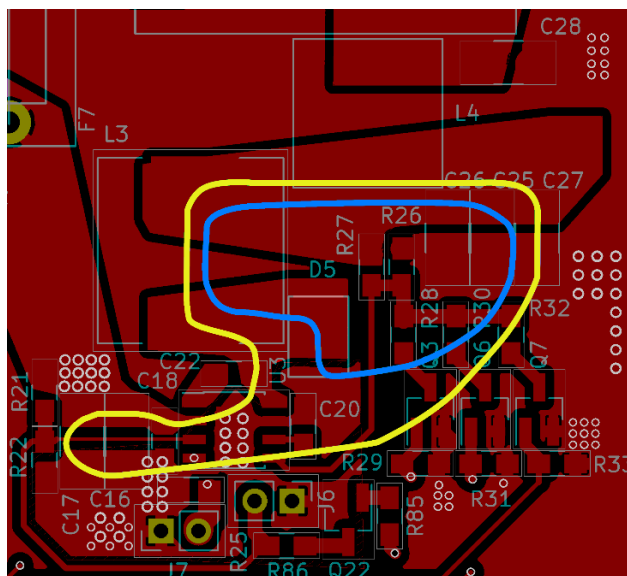
5.2 Návrh spínaných regulátorů snižujících napětí

Při návrhu spínaných regulátorů jsem se snažil zejména o minimalizaci proudových smyček, a to tak, že jsem umisťoval součástky co nejbližší k sobě a snažil jsem se držet doporučení uvedených v příslušných datasheetech. Jelikož jsem při návrhu všech tří měničů snižujících napětí postupoval obdobně, je zde uveden pouze jeden, konkrétně výstupní regulátor s použitým integrovaným obvodem LMR14020-Q1. Návrh tohoto regulátoru je uveden na Obr. 5.2, který zachycuje horní vrstvu DPS, na které je nejpodstatnější část tohoto zapojení. Pro přiblížení problematiky návrhu napěťových regulátorů jsou na tomto obrázku zachyceny dvě proudové smyčky, které ukazují aktivní část obvodu při jeho využívání. Pro názornost jsou zde Obr. 5.3 a Obr. 5.4.

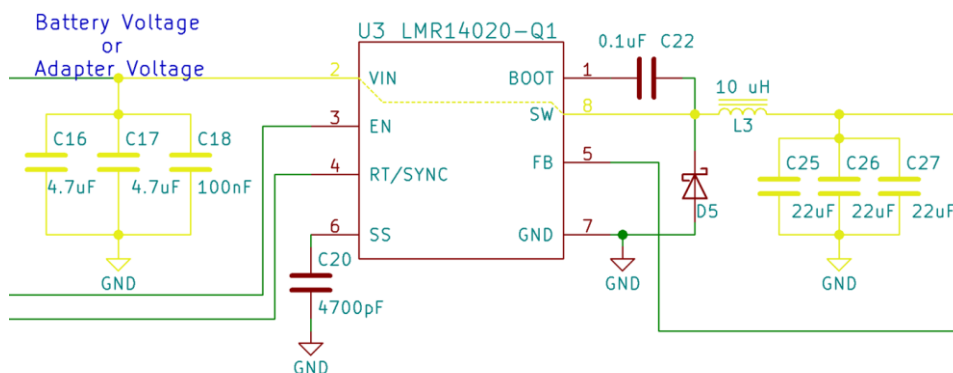
Obr. 5.3 na kterém je zachyceno schéma zapojení, ukazuje, že energie do cívky je propagována s pomocí interního tranzistoru uvnitř integrovaného obvodu. Na Obr. 5.4. je naopak stav, při kterém je vnitřní tranzistor v rozepnutém stavu a je využívána pouze elektrická energie uložená v indukčnosti. Pro úplnost je nutné dodat, že integrovaný obvod zajišťuje úroveň výstupního napětí správným nastavením časových intervalů těchto dvou stavů.

5 - Návrh DPS druhé verze powerbanky

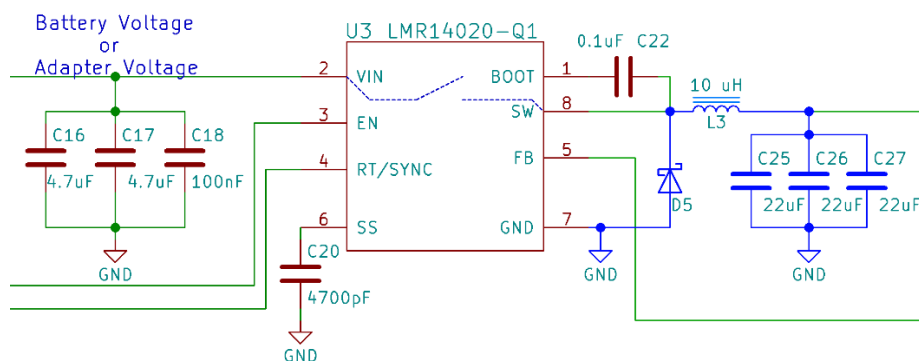
Z výše uvedeného vysvětlení principu činnosti měničů snižujících napětí je možné vyvodit, že nejkritičtější částí, z hlediska návrhu DPS, je výstup integrovaného obvodu. Je to z toho důvodu, že na tomto místě se napětí mění nejrychleji a s ohledem na elektromagnetickou kompatibilitu je nutné tuto část minimalizovat.



Obr. 5.2: Část DPS zachycující návrh výstupního napěťového regulátoru



Obr. 5.3: Část schématu zachycující proudovou smyčku při dodávání energie do indukčnosti



Obr. 5.4 : Část schématu zachycující proudovou smyčku při využívání energie z indukčnosti

5.3 Výhody použití rozlité mědi

Na navrženém plošném spoji jsou některé prvky propojeny rozlitou mědí namísto propojovací cesty. Důvod použití této metody je vysvětlen v následujících třech podkapitolách.

5.3.1 Minimalizace úbytku napětí na vedení

Elektrický odpor vodiče je možné určit podle vztahu 5.2

$$R_{DPS} = \rho_{cu} \frac{l}{A} \quad 5.2$$

kde $\rho_{cu} = 17.8 \cdot 10^{-9} \Omega m$ [36] je měrný elektrický odpor mědi, l délka vodiče a A jeho průřez. Podle vztahu 5.2 tedy můžeme říci, že se zvyšující se plochou vodiče dochází ke snižování jeho odporu, a právě toho můžeme využít použitím rozlité plochy namísto spojovacích cest.

Z hlediska minimalizace úbytku napětí na vedení má velký význam zejména rozlité zem. Pokud by byly země spojovány obyčejnou propojovací cestou, mohlo by dojít k úbytku napětí na této cestě, vedoucí například k nepřesnému měření.

Uvažujme případ, kdy je vodičem spojující země dvou obvodů o šířce 1.5 mm, tloušťce 18 um [37] (tloušťka vodiče na DPS vyrobené metodou POOL servis) a délce 10 cm veden proud 2 A. S pomocí vztahu 5.2 můžeme snadno určit odpor vodiče (5.3).

$$R_{DPS} = \frac{17.8 \cdot 10^{-9} \Omega m \cdot 0.1 m}{(18 \cdot 10^{-6} \cdot 1.5 \cdot 10^{-3}) m^2} \doteq 0.0636 \Omega. \quad 5.3$$

Pak můžeme snadno určit, že na vodiči dojde k úbytku napětí až 127 mV.

$$\Delta U_{10 cm} = R_{DPS} \cdot I = 0.0636 \Omega \cdot 2 A = 0.127 V \quad 5.4$$

Rezistenci rozlité mědi bychom mohli určit pomocí součtu jednotlivých částí v závislosti na průřezu. Je tedy patrné, že rozlitou mědí se úbytek na vedení značně minimalizuje. Nutno však dodat, že z hlediska zatížitelnosti je podstatná jen ta část spoje s nejmenším průřezem.

5.3.2 Zvýšení kapacity

Další výhodou použití metody rozlité mědi je zvýšení kapacity. Pokud jsou u vícevrstevných desek plošných spojů plochy s různými potenciály naproti sobě, pak tvoří kapacitu, kterou lze spočítat podle vztahu 5.5.

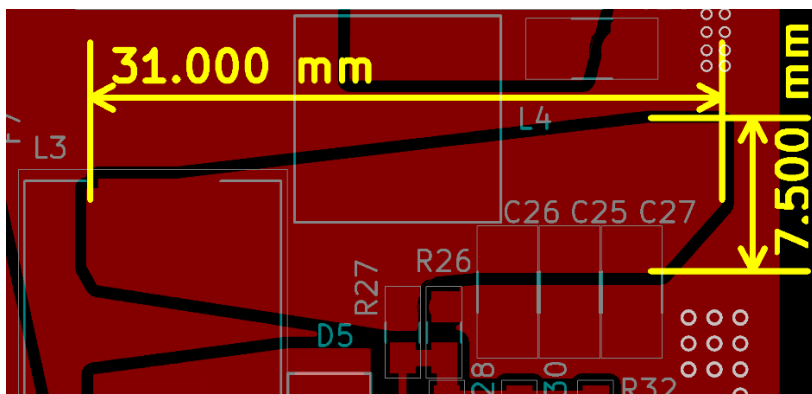
$$C_{DPS} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{l} \quad 5.5$$

Na obrázku Obr. 5.5 je pro příklad uvedena horní část DPS, na které je rozlité měď s napětím výstupního měniče. Jelikož se pod touto plochou z druhé strany desky nachází rozlité zem, můžeme podle zmíněného vztahu 5.5 a znalosti vzdálenosti ploch [37], snadno určit o jakou hodnotu jsme kapacitu navýšili.

$$C_{DPS} = \epsilon_0 \cdot 4.4 \cdot \frac{(31 \cdot 7.5) mm^2}{1.5 mm} = 6.04 pF \quad 5.6$$

5 - Návrh DPS druhé verze powerbanky

Jak je možné vidět ve vztahu 5.6, navýšení kapacity v tomto případě příliš závratné není. Tato kapacita však funguje v širším frekvenčním pásmu a je kvalitnější, než kapacita poskytnutá přidanými součástkami. Pokud by byl použit materiál s větší relativní permitivitou ϵ_r nebo by byla větší společná plocha dvou desek, případně bychom využili tenčího materiálu, mohli bychom kapacitu zvýšit.



Obr. 5.5 : Část schématu zachycující přibližnou velikost plochy potřebnou k určení kapacity

Z hlediska kapacity DPS je použití rozlitych ploch zvláště výhodné při využití čtyřvrstvé, či vícevrstvé plošných spojů. Při návrhu takovýchto plošných spojů jsou většinou vnitřní vrstvy tvořeny pouze z rozlitych ploch rozdílných potenciálů. Jelikož jsou tyto vnitřní vrstvy blíže u sebe než vnější vrstvy dvoustranného plošného spoje, a navíc je možné v nich využít daleko více plochy, přináší tato metoda větší hodnotu kapacity. Hlavní výhodou 4 a vícevrstvé plošných spojů je však minimalizace proudových smyček vedoucích k lepší elektromagnetické kompatibilitě.

Na rozdíl od první verze powerbanky nebyly ve druhé verzi použity nějak zvláště neodolné prvky, proto nebylo třeba použít více než 2 vrstev, což výrazně snížilo výrobní náklady.

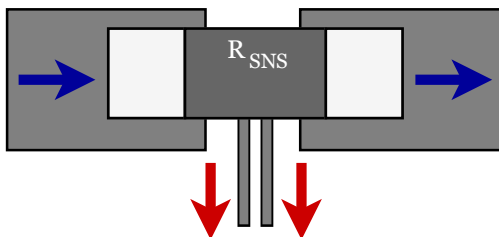
5.3.3 Lepší odvod tepla

Součástky, na nichž je ztracen výkon, je potřeba chladit. V případě, že tento výkon není příliš velký, je možné využít měď také k odvodu tepla. Vodivá plocha však může odvádět teplo, i když není vodič se součástkou spojena. Proto je vhodné u prvků, které je třeba chladit přidat rozlitou měď i do ostatních vrstev.

5.4 Zapojení rezistorů měřící proud

Pro správné měření úbytku napětí na rezistorech R8, R76 a R78 bylo použito 4-svorkového zapojení, které zachycuje Obr. 5.6. Modrá barva představuje měřený proud a červenou barvou jsou vyznačeny měřící spoje.

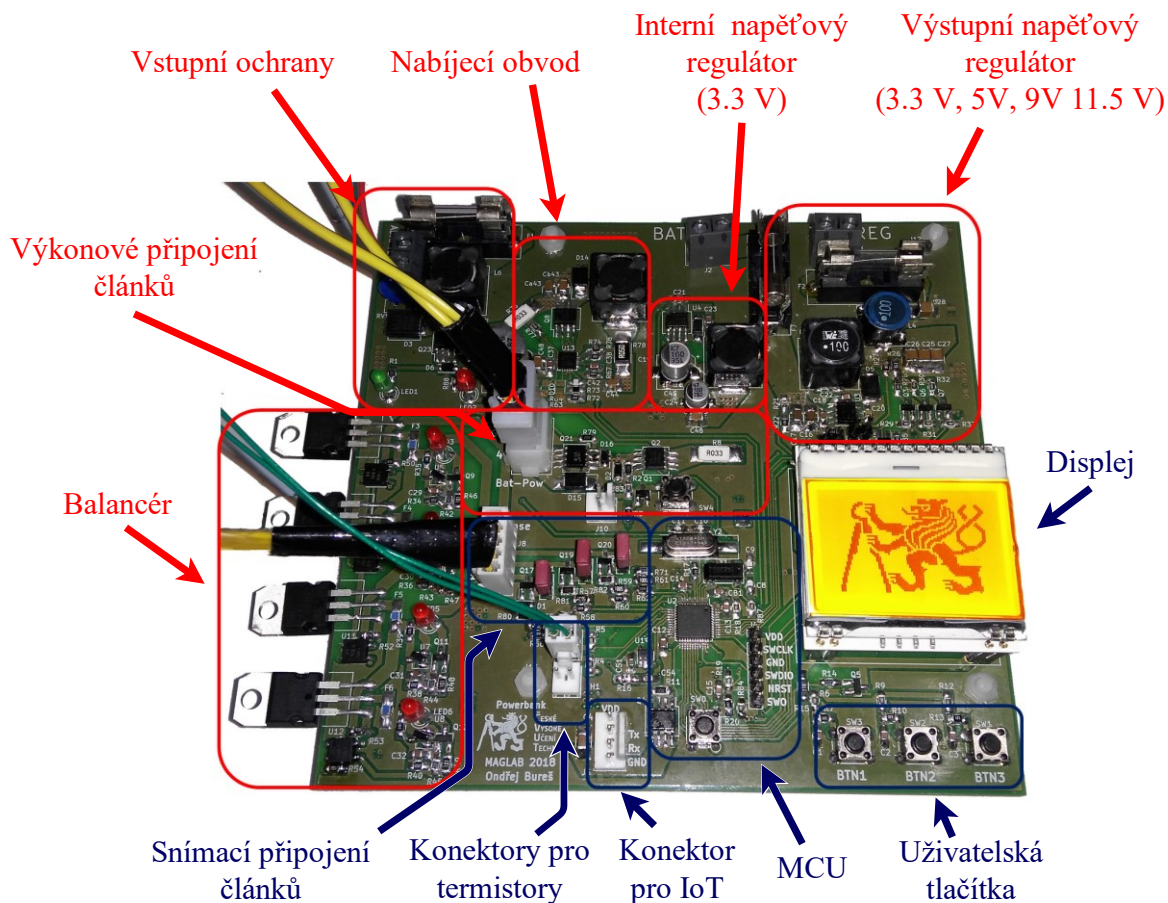
Díky této metodě měříme pouze napětí na snímaném rezistoru bez úbytku napětí na vodiči.



Obr. 5.6: Návrh snímacích rezistorů na DPS.

5.5 Rozložení na DPS

Rozložení jednotlivých obvodů je uvedeno na Obr. 5.7. Výkonové části jsou zvýrazněny červeně a signálové, případně ovládací části modře.



Obr. 5.7: Rozložení jednotlivých obvodů na DPS.

6 Firmware

Tato kapitola pojednává o vytvoření firmwaru. Jsou zde vyjmenovány použité programy a vysvětlený princip funkce napsaného kódu.

6.1 Použité programy a knihovny k vytvoření firmwaru

K vytvoření firmwaru byl použit program STM32CubeMX a vývojové prostředí Eclipse. Program STM32CubeMX spolu s využitím knihoven HAL¹² [38] umožňuje vygenerovat kód v jazyce C, který nastavuje, podle potřeb, daný mikrokontrolér.

Tuto kostru bylo možné po importování do vývojového prostředí Eclipse modifikovat, přeložit do binární podoby a s využitím ST-link nahrát do mikrokontroléru.

K ovládání displeje jsem využil knihovnu *u8glib* [39]. K její správné funkci bylo třeba definovat ve zdrojovém souboru *u8g_arm.c*, jak a kdy se mají displeji data posílat. Jelikož použitý displej komunikuje po sběrnici SPI, tak byla k vysílání dat i příkazů použita metoda *HAL_SPI_Transmit* z knihoven HAL, která k tomuto účelu slouží.

6.2 Struktura kódu

Napsaný program je rozdělen do zdrojových a hlavičkových souborů, čímž zpřehledňuje kód. Daná problematika je tedy popsána v samostatných souborech, a v metodě *main* jsou tak pouze volány potřebné metody. Díky tomu je kód čitelnější.

Po inicializaci dojde ke spuštění dvou timerů (časovačů), které vykonávají předepsanou činnost paralelně s hlavním cyklem.

Chování programu je zachyceno na Obr. 6.1. Pro větší přehlednost byly při jeho návrhu použity různé barvy. Podmínky jsou označeny zelenou barvou, události světle šedou a neimplementované funkce červenou barvou. Neimplementované funkce se týkají odesílání dat na server s využitím modulu IoT. Z důvodu popsanych potíží s první verzí, nebyl dostatek času na implementování IoT modulu.

Vyvíjený kód je možné nalézt na webové stránce <https://github.com/OBU5/STM32L433CC-Powerbank>.

6.2.1 Hlavní cyklus

Jak je možné z obrázku vypožorovat, hlavní cyklus má za úkol měření veličin, vyhodnocení jejich reálné reprezentace a následné zobrazení na LCD. Pokud dojde k detekci problému, jako je například zjištění vybití akumulátorů, případně jeho vysoká teplota, dojde k odeslání dat na server a vypnutí zařízení.

V hlavním programu je dále zjišťována přítomnost adaptéru a v závislosti na stavu kapacity článků je volen nabíjecí proud. Pokud jsou články hluboce vybité, pak je nabíjecí proud limitován na 200 mA. Hluboce vybitým článkem se myslí článek, jehož napětí na prázdko je menší než 3 V. V případě, že články již nejsou hluboce vybité, pak se nabíjecí proud zvýší na hodnotu 2 A, dokud nejsou všechny články zcela nabité.

¹² Hardware Abstract Layer

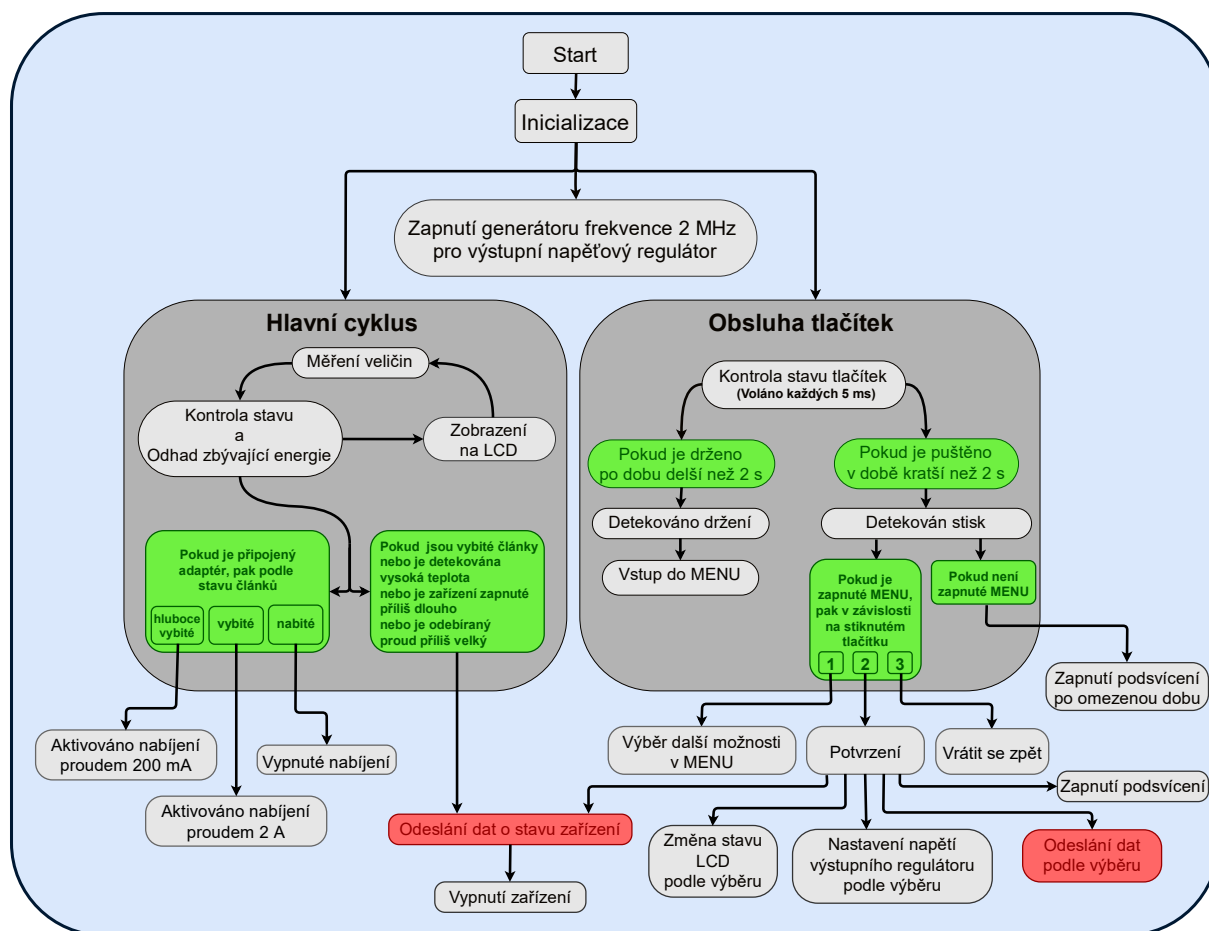
6.2.2 Obsluha tlačítek

Další částí programu je obsluha tlačítek. Jak je na diagramu uvedeno, mikrokontrolér každých 5 milisekund kontroluje stav všech tlačítek. Tato hodnota byla určena experimentálně a ukázala se jako dostatečná.

Ke kontrole stavu je využito timeru, jelikož při detekci pouhé změny stavu nelze poznat, jak dlouho je tlačítko stisknuté. MCU tak může vyhodnotit, zda je tlačítko jen stisknuto nebo drženo po delší dobu.

6.2.3 Timer generující frekvenci

Pro přesnou provozní frekvenci výstupního napěťového regulátoru bylo využito mikrokontroléru ke generování synchronizační frekvence 2 MHz.



Obr. 6.1: Činnost firmwaru powerbanky

7 Konstrukce a ovládání

Plošný spoj je realizovaný na dvouvrstvé desce plošných spojů o rozměrech 132 mm × 126.5 mm. Jelikož se všechny použité prvky nacházejí pouze na této desce, je po jejím osazení zařízení funkční a k jeho nasazení do provozu je jen potřeba vybrat vhodný kryt. Použité konektory byly zvoleny klasických rozměrů, tedy s roztečí 2.54 mm a 5.08 mm. Některé z nich, jako například bateriové konektory, jsou „s klíčem“ a není tedy možné je špatně zapojit. Konektory sloužící k přísunu a odebírání energie, tedy konektory J1, J2, J3 jsou připravené k propojení desky s konektory zabudovanými v krytu, ve kterém se bude DPS nacházet. Výkonové tranzistory, které jsou součástí balancéru, jsou umístěny na okraji desky, aby bylo jejich připojení k chladiči snadné. Vzdáleny jsou od sebe s fixní roztečí 18.5 mm.

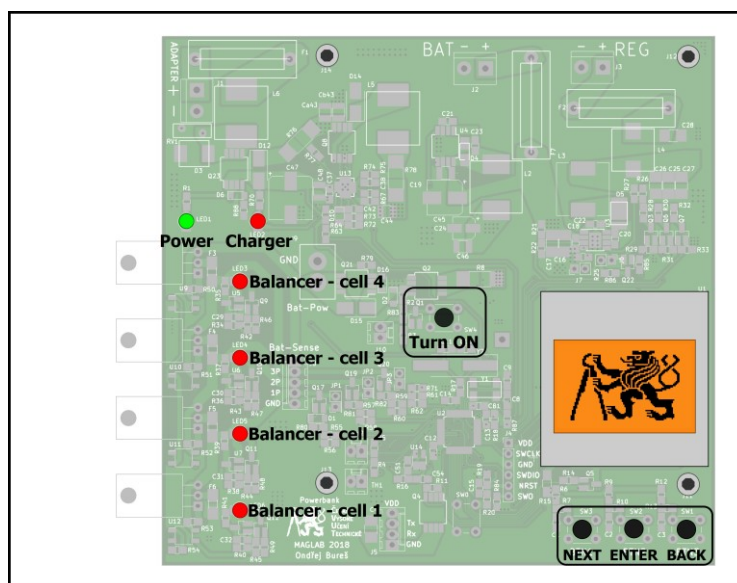
V současné době je osazená funkční deska plošných spojů. Kryt, do kterého se toto zařízení umístí, zatím nebyl vybrán. Na obrázku Obr. 7.1 je však znázorněn plánovaný přední panel, který uživateli usnadní pochopení rozmístění daných prvků. Pro úplnost je možné vidět umístění DPS. Pro připevnění DPS ke krytu jsou na desce otvory o průměru 3.5 mm. Jejich umístění je na Obr. 7.1 označeno značkou šestihhranného šroubu.

7.1 Význam jednotlivých tlačítek

K možnému ovládání zařízení jsou zde již zmíněná 4 tlačítka. Na Obr. 7.1 jsou uvedeny pod označením černého kruhu. Podržením tlačítka pojmenovaného „Turn ON“, které se nachází přibližně uprostřed DPS dojde k zapnutí zařízení. Po zapnutí zařízení je možné jej ovládat pomocí tlačítek v levém dolním rohu. Stiskem kteréhokoliv z nich dojde k rozsvícení podsvícení a jejich podržením dojde k zapnutí MENU. V menu se lze pohybovat pomocí stisku tlačítka „NEXT“. Pro potvrzení výběru je potřeba stisknout tlačítko „ENTER“ a pro vrácení zpět slouží tlačítko „BACK“.

7.2 Význam jednotlivých LED

Na DPS je přítomno 6 LED, které spolu s displejem zajišťují jednoduché porozumění stavu zařízení. Obr. 7.1 zachycuje jejich umístění na předním panelu. Zelená LED s označením „POWER“ indikuje přítomnost adaptéru a rozsvícení červené LED „Charger“ značí, že je nabíjecí obvod aktivní. Aktivování příslušného stupně balancéru je indikováno rozsvícením LED „Balancer – cell 1“ až „Balancer – cell 4“.



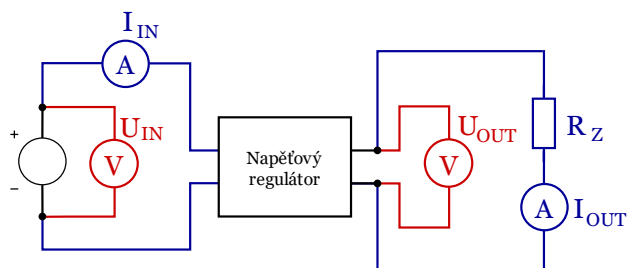
Obr. 7.1: Plánovaný přední panel

8 Měření parametrů

Pro účely měření byly použity 4 multimetry *HP 34401A*, osciloskop *LeCroy WaveJet*, termokamera *Testo 875-1* a laboratorní zdroj *GW INSTEK PST-3202*.

8.1 Měření parametrů výstupního napěťového regulátoru

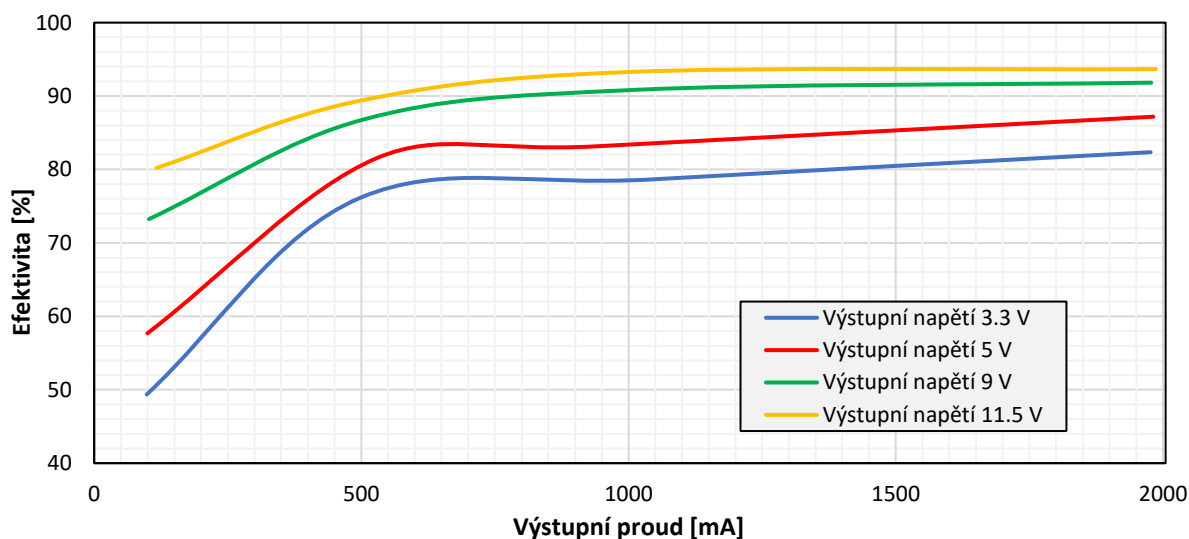
Při měření parametrů výstupního napěťového regulátoru bylo použito 4-svorkového zapojení, které je uvedeno na Obr. 8.1.



Obr. 8.1: Schéma zapojení napěťového regulátoru při měření parametrů.

Graf na obrázku Obr. 8.2 zachycuje rozdíly efektivity pro různá výstupní napětí. Lze z něj vypočítat, že s klesajícím rozdílem mezi vstupním a výstupním napětím roste efektivita regulátoru. Efektivita byla spočtena podle vztahu 8.1.

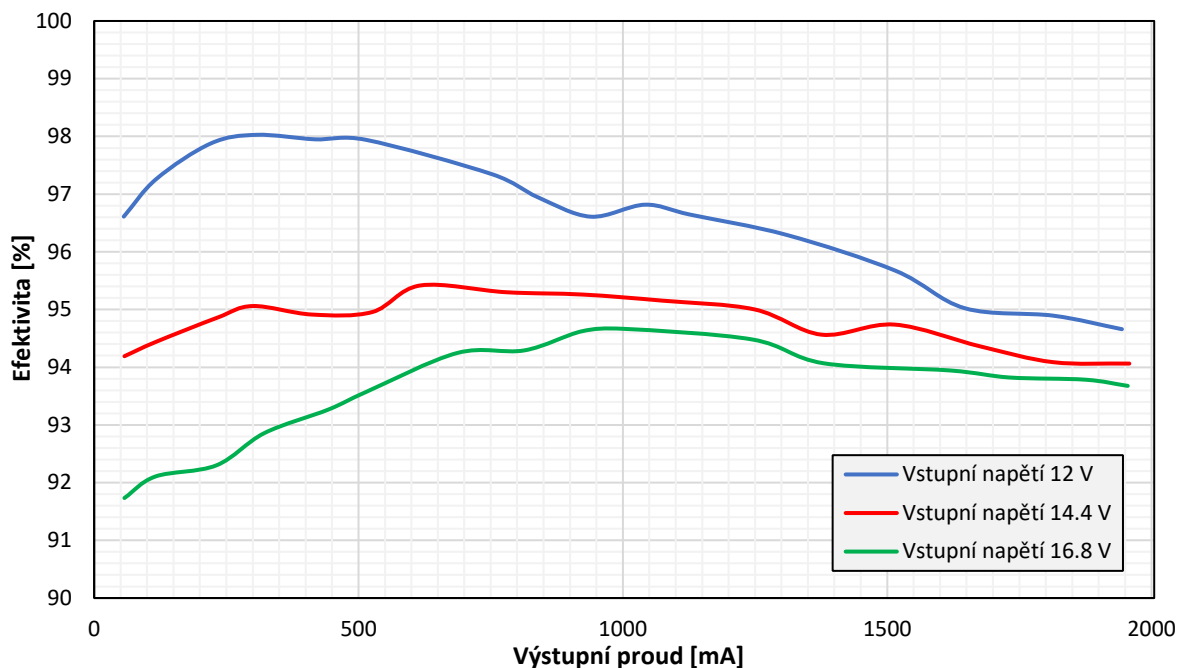
$$\eta = 100 \cdot \frac{U_{OUT} \cdot I_{OUT}}{U_{IN} \cdot I_{IN}} \quad 8.1$$



Obr. 8.2: Graf ukazující závislost efektivity na odebíraném proudu pro 4 úrovně výstupního napětí

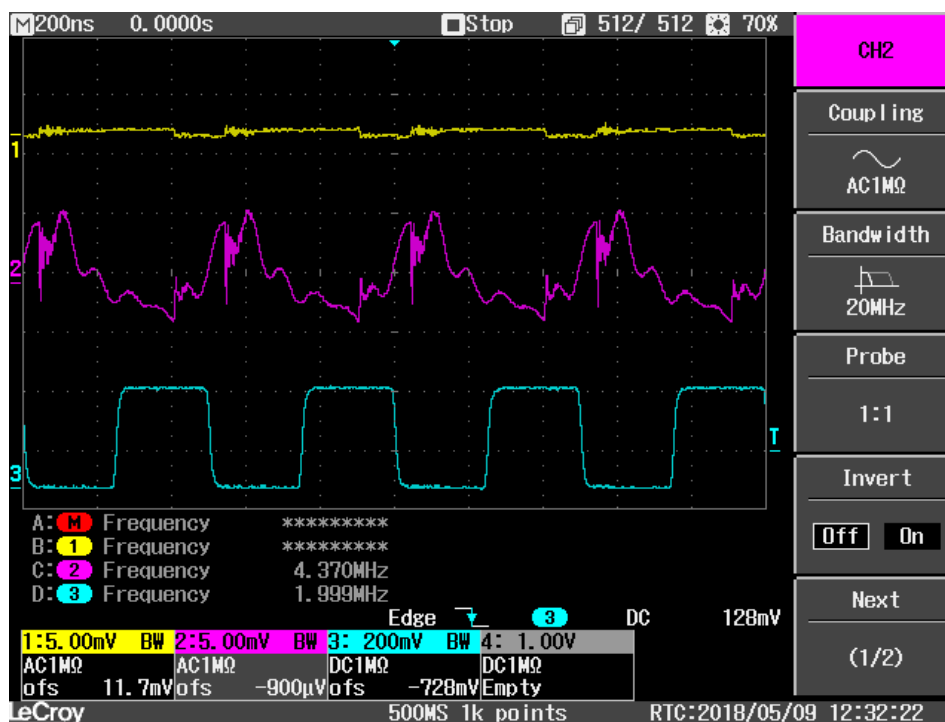
Průběh na obrázku Obr. 8.3 ukazuje efektivitu výstupního regulátoru s nastaveným výstupním napětím na hodnotu 11.5 V pro různá vstupní napětí. Nutno dodat, že při napájení 12 V, tedy minimálním uvažovaným napětím použitých článků, dochází k poklesu výstupního napětí z 11.5 V na 10.7 V.

8 - Měření parametrů



Obr. 8.3: Graf ukazující závislost efektivity výstupního regulátoru na odebíraném proudu pro výstupní napětí 11.5 V a vstupní napětí od 12 do 16.8 V

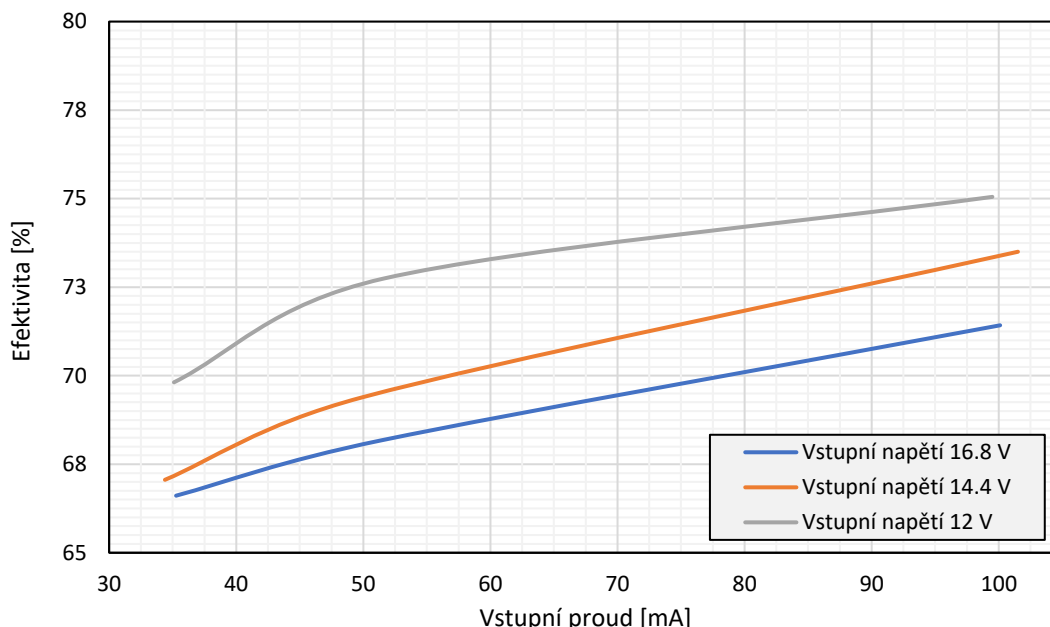
Na Obr. 8.4 je uveden průběh z osciloskopu při zatížení 2 A. Jak lze z tohoto průběhu vidět, je zvlnění, s ohledem na velikost odebíraného proudu, na vstupu i na výstupu minimální. Regulátor tedy funguje dle očekávání, s přípustným zvlněním.



Obr. 8.4: Průběh činnosti výstupního regulátoru při odebíraném proudu 2 A [Pořízeno na osciloskopu LeCroy WaveJet]
(tyrkysová-frekvence regulátoru, fialová-průběh vstupního napětí, žlutá-průběh výstupního napětí)

8.2 Měření efektivity interního napěťového regulátoru

Zapojení multimetrů a zatěžovacího rezistoru zachycuje opět Obr. 8.1. Graf na Obr. 8.5 ukazuje, jak se mění efektivity regulátoru v závislosti na vstupním napětí. Jelikož efektivity tohoto regulátoru není kritickým parametrem, lze říci, že tento obvod pracuje dostatečně uspokojivě.



Obr. 8.5: Graf ukazující závislost efektivity interního regulátoru na odebíraném proudu pro vstupní napětí od 12 do 16.8 V

Pro srovnání bychom mohli uvažovat případ, kdy bychom tento regulátor nahradili stabilizátorem. Pak by efektivity dosahovala nejvýše 27.5 %. Této hodnoty by bylo dosaženo při uvažovaném nejnižším vstupním napětí, tedy 12 V. Výpočet je zachycen ve vztahu 8.2.

$$\eta = 100 \cdot \frac{3.3 \text{ V} \cdot 50 \text{ mA}}{12 \text{ V} \cdot 50 \text{ mA}} = 27.5 \% \quad 8.2$$

8.3 Měření parametrů nabíjecího obvodu

Jelikož je tento obvod napájen z adaptéru, není efektivity kritickým parametrem. Důležitější hodnotou je výstupní proud, který regulátor dodává článkům. V průběhu nabíjení bylo změřeno, že v režimu hluboce vybitých baterií je článkům v počáteční fázi nabíjecího procesu dodáván proud 215 mA, a v režimu normálního nabíjení dosahuje proud hodnoty až 1.923 A. Hodnota proudu se dále mění v závislosti na dobití článků. Naměřené hodnoty z průběhu nabíjení jsou uvedeny v tabulce Tab. 8.1.

Efektivita nabíjecího obvodu				
U_{IN} [V]	I_{IN} [mA]	U_{OUT} [V]	I_{OUT} [mA]	η [%]
18	224.99	15.08	215	80.05
18	1948.99	16.67	1923	91.38

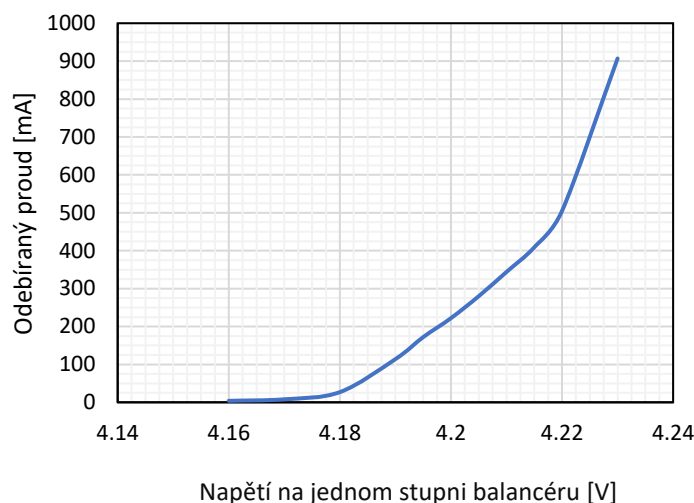
Tab. 8.1: Hodnoty získané při nabíjení článků

8.4 Ověření správného chování balancéru

K ověření správného chování balancéru byla potřeba zjistit závislost odebíraného proudu na velikosti napětí na článku v okolí 4.2 V. K těmto účelům byl místo článku připojen laboratorní zdroj, s jehož pomocí bylo možné napětí podle potřeby nastavit.

Jelikož se všechny 4 stupně chovaly téměř identicky, je zde uveden průběh pouze jednoho z nich. Závislost odebíraného proudu na změně napětí je uvedena na Obr. 8.6.

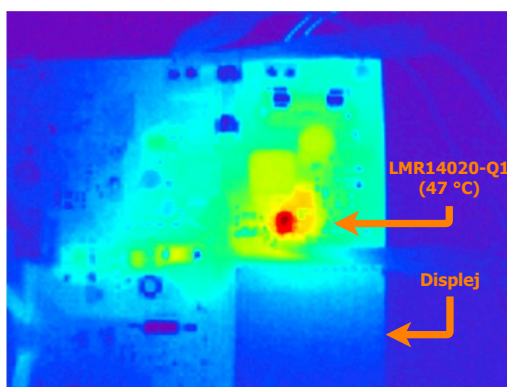
Při testování však bylo zjištěno, že přidání zmíněných optočlenů je poměrně neefektivní, jelikož nezabraňují výkonovému tranzistoru v jeho otevírání.



Obr. 8.6: Graf ukazující závislost velikosti odebíraného proudu na přiloženém napětí na jednom stupni balancéru

8.5 Měření teploty zařízení.

V rámci testování zařízení byla měřena jeho teplota. Při využívání výstupního regulátoru napětí bylo zjištěno, že nekritičtější teplotou je teplota integrovaného obvodu LMR14020-Q1, která dosahovala po 20 minutách provozu se zatížením 2 A hodnoty 47 °C. Průběh z měření pomocí termokamery je na Obr. 8.7. Další součástí, jejíž teplota je vyšší než okolních součástek, je Schottkyho dioda D12. Její teplota dosahovala po 20 minutách nabíjení proudem 2 A hodnoty 52 °C. Ani jedna z těchto naměřených teplot není dramaticky vysoká a zařízení je při změnách teplot stabilní.



Obr. 8.7: Snímek ukazující nejvyšší teplotu při provozu výstupního napěťového regulátoru [Zachyceno termokamerou Testo 875-1]

9 Závěr

Hlavní body zadání byly splněny. Bylo navrženo a zrealizováno zařízení, které zajišťuje nabíjení a ochranu použitých Li-Ion článků a umožňuje nastavení výstupního napětí s maximálním proudovým zatížením 2 A.

V rámci této práce bylo potřeba navrhnout schéma zapojení, desku plošných spojů včetně jejího osazení a otestovat její funkčnost pro dvě verze vysokokapacitní powerbanky. Pro druhou verzi byl dále napsán firmware a byly změřeny parametry daných obvodů.

První verze po zhotovení neumožňovala nabíjení článků, a tak bylo třeba navrhnout verzi druhou. Jelikož bylo poměrně časově náročné znovu zařízení navrhnout, osadit a otestovat, nezbyl čas na implementování modulu zajišťujícího komunikaci, vybrání krytu na zařízení či případného přidání jiných volitelných funkcí.

Použitý firmware nebyl zatím řádně otestován a je tedy možné, že se v něm nacházejí nějaké chyby. Před začleněním zařízení do provozu je tedy nutné ověřit správnost jeho chování a případné chyby odstranit.

Při měření použitého napěťového regulátoru umožňujícího nastavení výstupního napětí bylo zjištěno, že jeho účinnost při uvažovaném výstupním napětí 11.5 V se pohybuje okolo 95 %. Při dosažení minimální uvažované hodnoty napětí článků, tedy 12 V, a odebíraném proudu 2 A však není regulátor schopný zajistit na výstupu napětí 11.5 V, ale pouze 10.7 V. Tato hodnota však byla shledána dostatečnou.

Použitý nabíjecí obvod spolu s balancérem pracují při nabíjení dle očekávání. Při vybíjení nedochází k požadovanému vypnutí balancéru, ale pouze k jeho částečnému potlačení. Odebíraný proud tedy není dostatečně limitován a použité články jsou zbytečně vybíjeny.

Zařízení je možné několika způsoby rozšířit. Rozšíření je možné docílit například přidáním již několikrát zmíněného modulu IoT, umožněním ukládání dat do vnitřní paměti mikrokontroléru, implementováním RTC k zobrazení času, případně vylepšení odhadu zbývajících energie. Pro případný návrh další verze DPS by bylo vhodné lépe vyřešit zapojení balancéru a zmenšení rozměrů DPS.

Použitá literatura

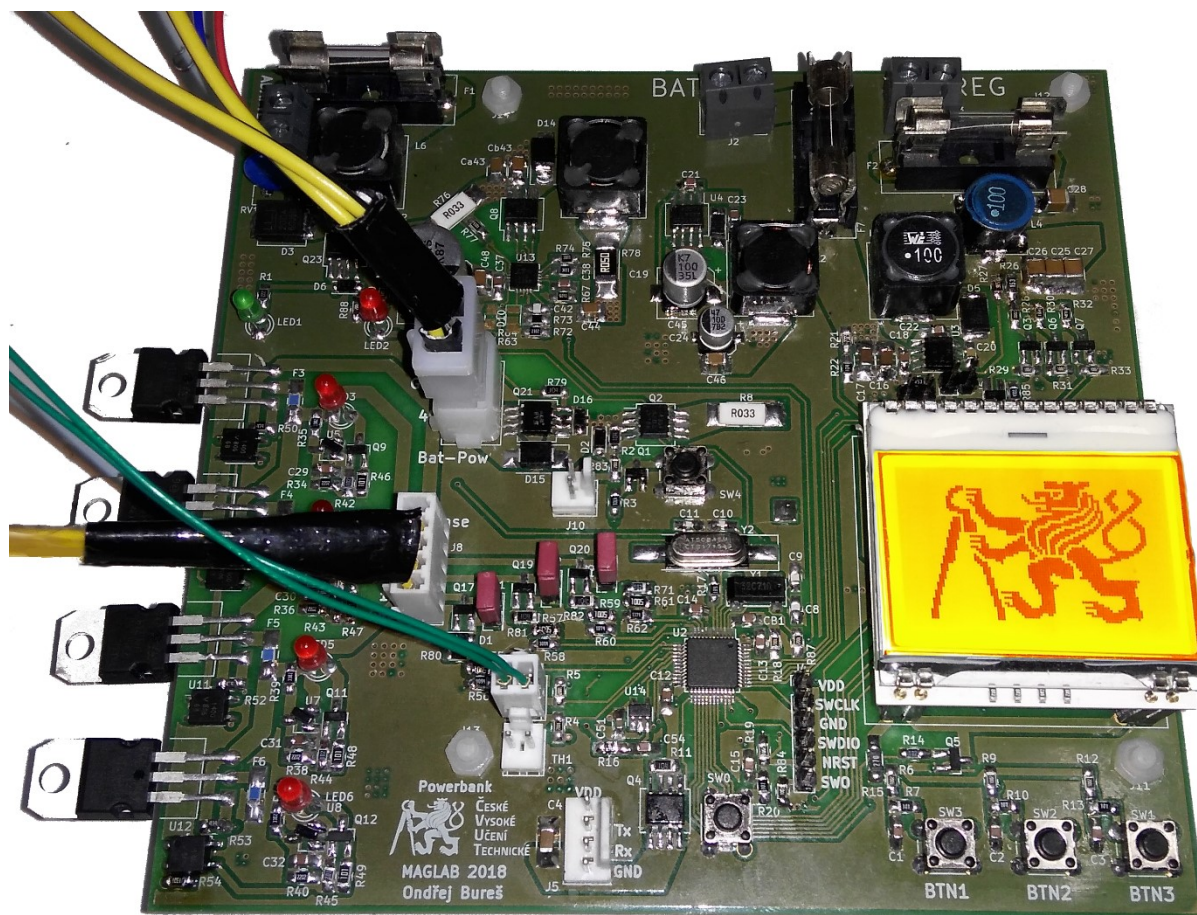
- [1] „Viking Smartech II,“ Alza a.s., [Online]. Available: <https://www.alza.cz/viking-smartech-ii-40000mah-seda-qc-3-0-d5151325.htm>. [Přístup získán 12. 2. 2018].
- [2] „Viking Smartech II,“ BONA SPES s.r.o., [Online]. Available: <http://www.smartech-powerbank.cz/znacka/viking/>. [Přístup získán 28. 4. 2018].
- [3] „DOCA Powerbank 95000 mAh,“ Alza a.s., [Online]. Available: <https://www.alza.cz/doca-powerbank-95000mah-cerna-d5149769.htm?o=4>. [Přístup získán 12. 2. 2018].
- [4] „DOCA 95000 mAh,“ ForCamping s.r.o., [Online]. Available: <https://www.4camping.cz/p/power-banka-doca-75000-mah/>. [Přístup získán 4. 4. 2018].
- [5] „Galvanické články - fyzikální základy,“ ČEZ, a.s., [Online]. Available: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz2.htm>. [Přístup získán 12. 2. 2018].
- [6] „Battery Charging,“ Texas Instruments Inc., [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/an/snva557/snva557.pdf>. [Přístup získán 15. 5. 2018].
- [7] „Battery cell comparison,“ Epec, [Online]. Available: <http://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>. [Přístup získán 28. 4. 2018].
- [8] „Long 12V 7Ah olověný akumulátor,“ AVACOM s.r.o., [Online]. Available: <https://www.avacom.cz/long-12v-7ah-oloveny-akumulator-f1-wps712>. [Přístup získán 14. 5. 2018].
- [9] „18650 Panasonic 3400mAh,“ AVACOM s.r.o., [Online]. Available: <https://www.avacom.cz/nabijeci-prumyslova-baterie-18650-panasonic-3400mah-3-7v-liion--vyvody-do-u>. [Přístup získán 8. 5. 2018].
- [10] „LP805080,“ TME, s.r.o., [Online]. Available: https://www.tme.eu/cz/details/accu-lp805080_cl/akumulatory/cellevia-batteries/lp805080/. [Přístup získán 14. 5. 2018].
- [11] V. Janíček, „Mobilní zdroje,“ [Online]. Available: <https://moodle.fel.cvut.cz/mod/resource/view.php?id=56447>. [Přístup získán 12. 2. 2018].
- [12] „Modul LPWAN,“ LPWAN s.r.o, [Online]. Available: <https://www.lpwan.cz/>. [Přístup získán 12. 5. 2018].
- [13] M. Zikmund, „Jak se vyznat v mobilních datových sítích,“ businessvize.cz, [Online]. Available: <http://www.businessvize.cz/datove-prenosy-a-site/jak-se-vyznat-v-mobilnich-datovych-sitich-gsm-gprs-edge>. [Přístup získán 12. 2. 2018].
- [14] „SIM800H,“ TME, s.r.o., [Online]. Available: <https://www.tme.eu/cz/details/sim800h/moduly-gsmgprshpaedgelte/simcom/>. [Přístup získán 12. 2. 2018].
- [15] „SIM800 Hardware Design V1.08,“ SIMCom, [Online]. Available: http://simcom.ee/documents/SIM800/SIM800_Hardware%20Design_V1.08.pdf.

- [16] „Radio Technology Keyoints,“ Sigfox, [Online]. Available: <https://www.sigfox.com/en/sigfox-iot-radio-technology>. [Přístup získán 12. 2 2018].
- [17] „LPWAN SigFox node,“ Sigfox, [Online]. Available: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.773-022.1.pdf>. [Přístup získán 9. 5. 2018].
- [18] „Sigfox coverage,“ Sigfox, [Online]. Available: <https://www.sigfox.com/en/coverage>. [Přístup získán 12. 2. 2018].
- [19] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melià-Seguí a T. Watteyne, „Understanding the Limits of LoRaWAN,“ IEEE Communications Magazine, [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1607.08011.pdf>. [Přístup získán 12. 5. 2018].
- [20] „IoT 868MHz LoRa LPWAN Modul 1276,“ ECLIPSE s.r.o., [Online]. Available: <https://arduino-shop.cz/martin/1486-iot-868mhz-lora-lpwan-modul-1276-cra-kompatibilni-1476993740.html>. [Přístup získán 12. 2. 2018].
- [21] „Služby IoT,“ České Radiokomunikace a.s., [Online]. Available: <https://www.cra.cz/sluzby-iot>. [Přístup získán 12. 2. 2018].
- [22] „BQ40Z60,“ Texas Instruments Inc., [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq40z60.pdf>. [Přístup získán 11. 3. 2018].
- [23] „SFH0412,“ Dexerials Europe B.V., [Online]. Available: <http://www.dexerials.jp/en/products/c3/sfh0412.html>. [Přístup získán 28. 4. 2018].
- [24] T. Instruments, „SLUUB71,“ Texas Instruments Inc., [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ug/sluub71/sluub71.pdf>. [Přístup získán 13. 3. 2018].
- [25] „EV2300,“ Texas Instruments Inc., [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ug/sluiu159e/sluiu159e.pdf>. [Přístup získán 13. 3. 2018].
- [26] „TI Forum,“ Texas Instruments Inc., [Online]. Available: https://e2e.ti.com/support/power_management/battery_management/f/180/t/660932. [Přístup získán 13. 3 2018].
- [27] „LTC4009,“ Linear Technology Corporation, [Online]. Available: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/4009fd.pdf>. [Přístup získán 20. 3. 2018].
- [28] „VO1400AEF,“ Vishay Intertechnology, Inc, [Online]. Available: <https://cz.mouser.com/ds/2/427/vo1400aeftr-244774.pdf>. [Přístup získán 20. 3. 2017].
- [29] „LMR14020-Q1,“ Texas Instruments Inc., [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/snvsag4a/snvsag4a.pdf>. [Přístup získán 9. 5. 2018].
- [30] „MAX5033,“ Maxim Integrated, [Online]. Available: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX5033.pdf>. [Přístup získán 9. 5. 2018].
- [31] „AN2606,“ STMicroelectronics, Inc., [Online]. Available: <https://stm32.eu/wp-content/uploads/2012/05/AN2606-1.pdf>. [Přístup získán 27. 3. 2018].
- [32] „STM32L433xx,“ Texas Instruments Inc., [Online]. Available: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/f7/a0/fc/27/24/4e/4f/3f/DM00257192.pdf/files/DM00257192.pdf/jcr:content/translations/en.DM00257192.pdf>. [Přístup získán 9. 5. 2018].

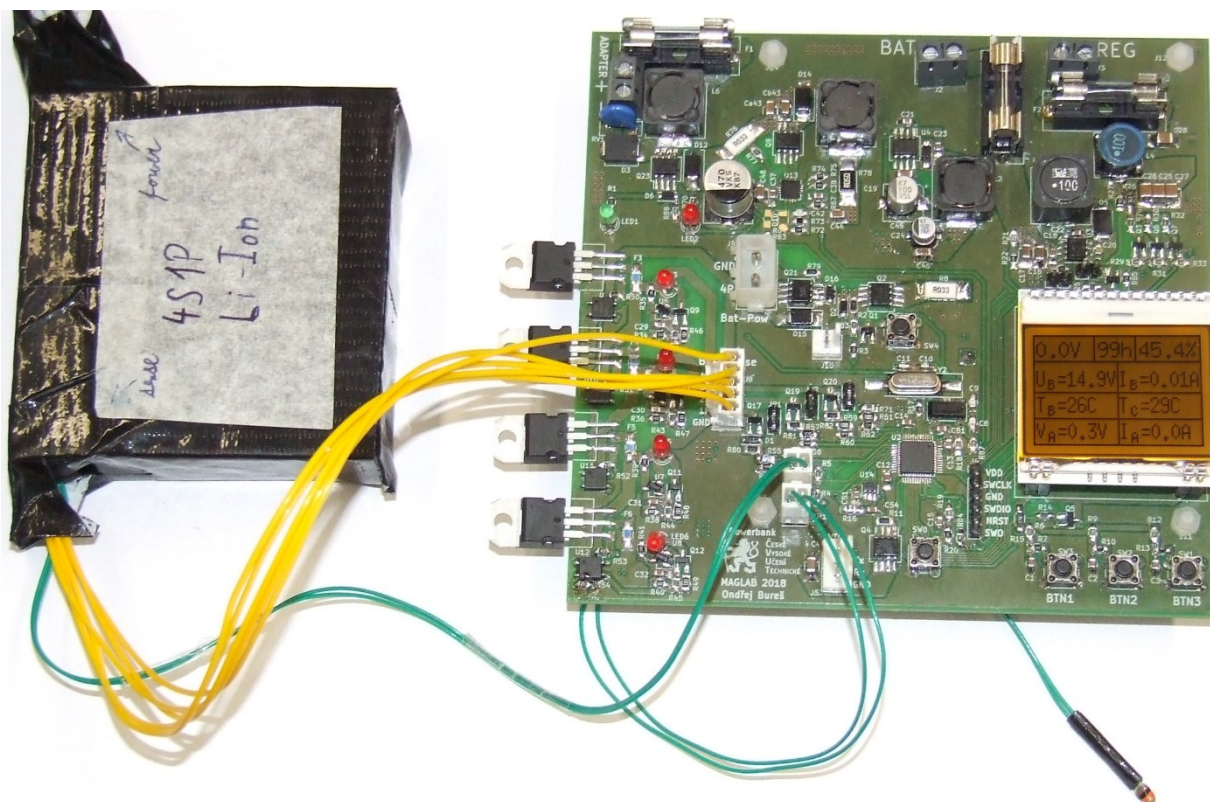
- [33] „MCP6001,“ Microchip Technology Inc., [Online]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21733j.pdf>. [Přístup získán 27. 3. 2018].
- [34] „INA181,“ Texas Instruments Inc, [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina181.pdf>. [Přístup získán 9. 3. 2018].
- [35] „Dogs graphic series 102x64 DOTS,“ ELECTRONIC ASSEMBLY GmbH, [Online]. Available: <https://www.lcd-module.com/eng/pdf/grafik/dogs102-6e.pdf>. [Přístup získán 12. 2. 2018].
- [36] V. Záhlava, „Vlastnosti DPS,“ [Online]. Available: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/125293/mod_resource/content/2/01_Vlastnosti_DPS.pdf. [Přístup získán 9. 5. 2018].
- [37] „POOL servis - princip výroby,“ PragoBoard s.r.o., [Online]. Available: https://www.pragoboard.cz/pool_servis. [Přístup získán 9. 5. 2018].
- [38] „Description of STM32L4/L4+ HAL and low-layer drivers,“ STMicroelectronics, Inc., [Online]. Available: http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/63/a8/8f/e3/ca/a1/4c/84/DM00173145.pdf/files/DM00173145.pdf/jcr:content/translations/en.DM00173145.pdf. [Přístup získán 5. 3. 2018].
- [39] O. Kraus, „knihovna u8glib,“ [Online]. Available: <https://bintray.com/olikraus/u8glib/ARM/view>. [Přístup získán 8. 5. 2018].

Přílohy

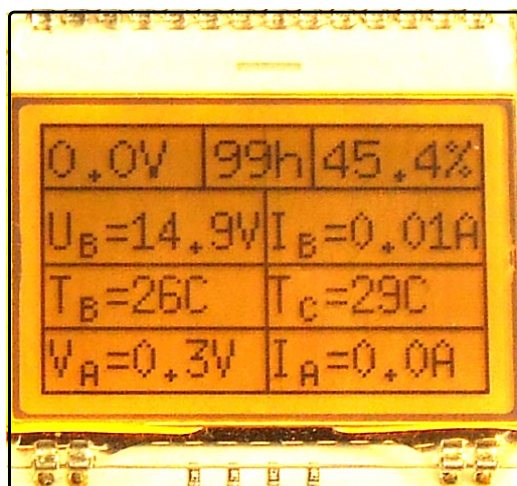
A Fotografie zařízení



Obr. A.1: Osazená deska plošných spojů zařízení (2. verze)



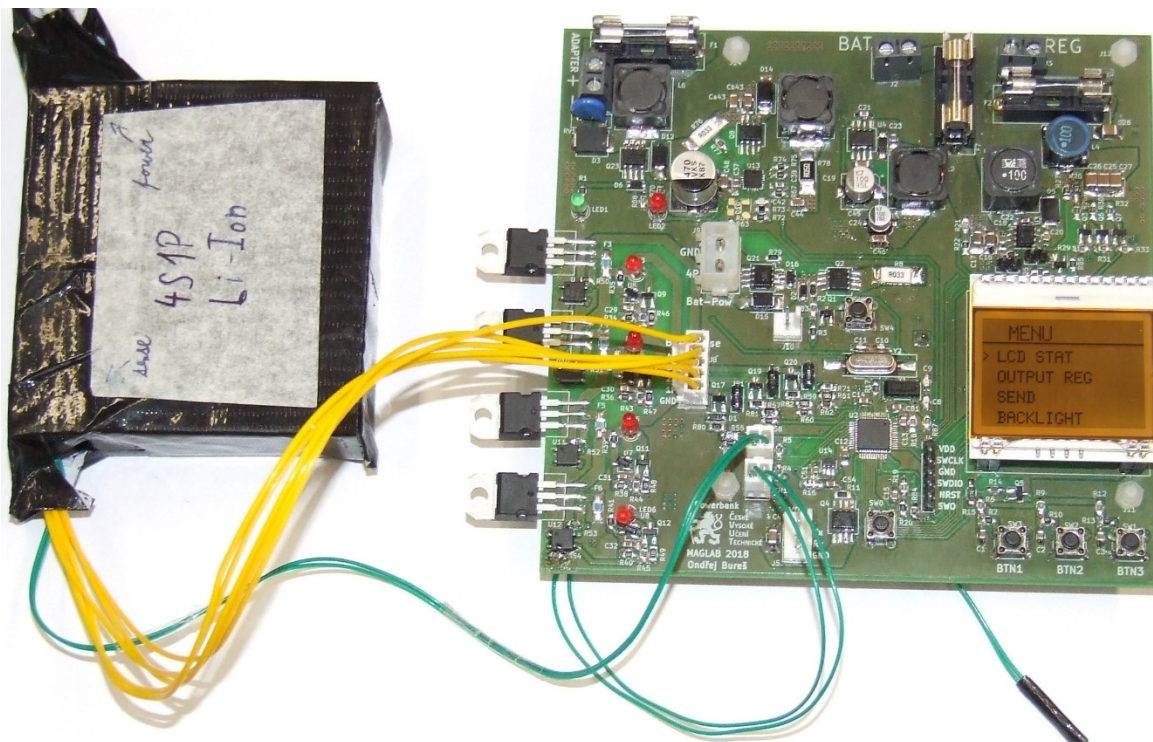
Obr. A.2: Zařízení se zobrazenými základními údaji (2. verze)



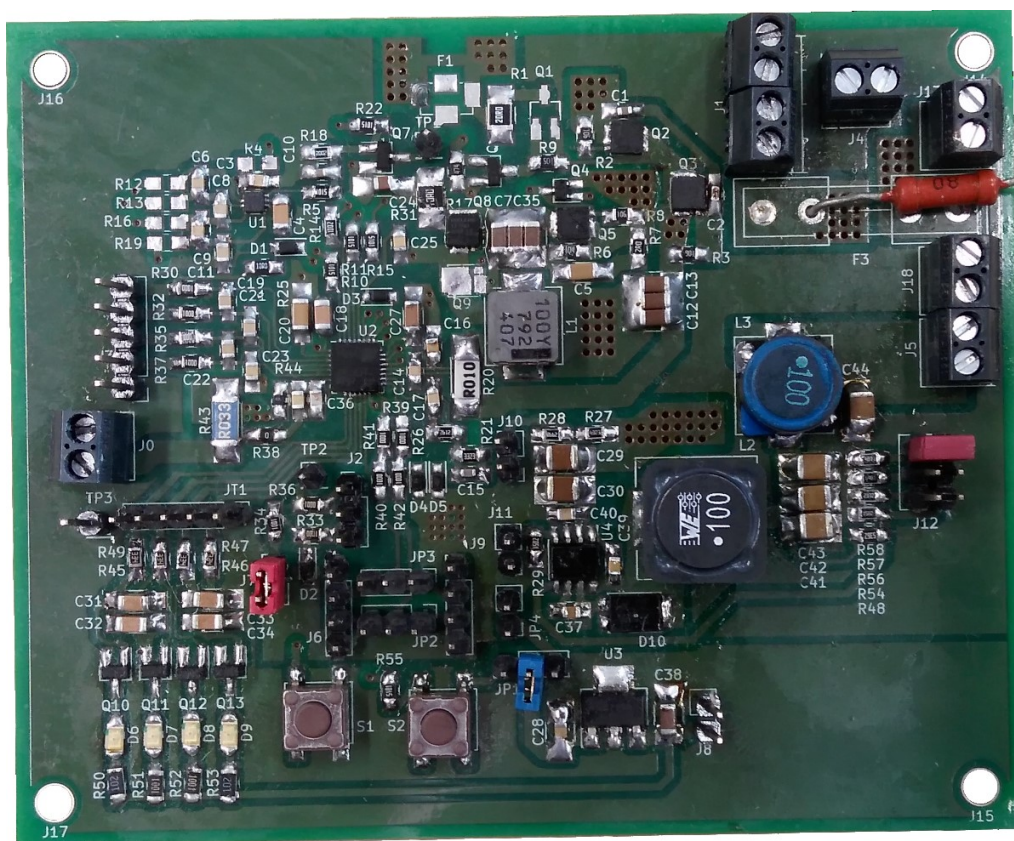
=

Hodnota nastaveného výstupního napětí	Zbývajících čas do vybití	Dostupná kapacita v procentech
Celkové napětí článků		Odebíraný proud z článků
Teplota článků		Teplota balancéru
Napětí adaptéru		Nabíjecí proud

Obr. A.3: Význam základních údajů (2. verze)

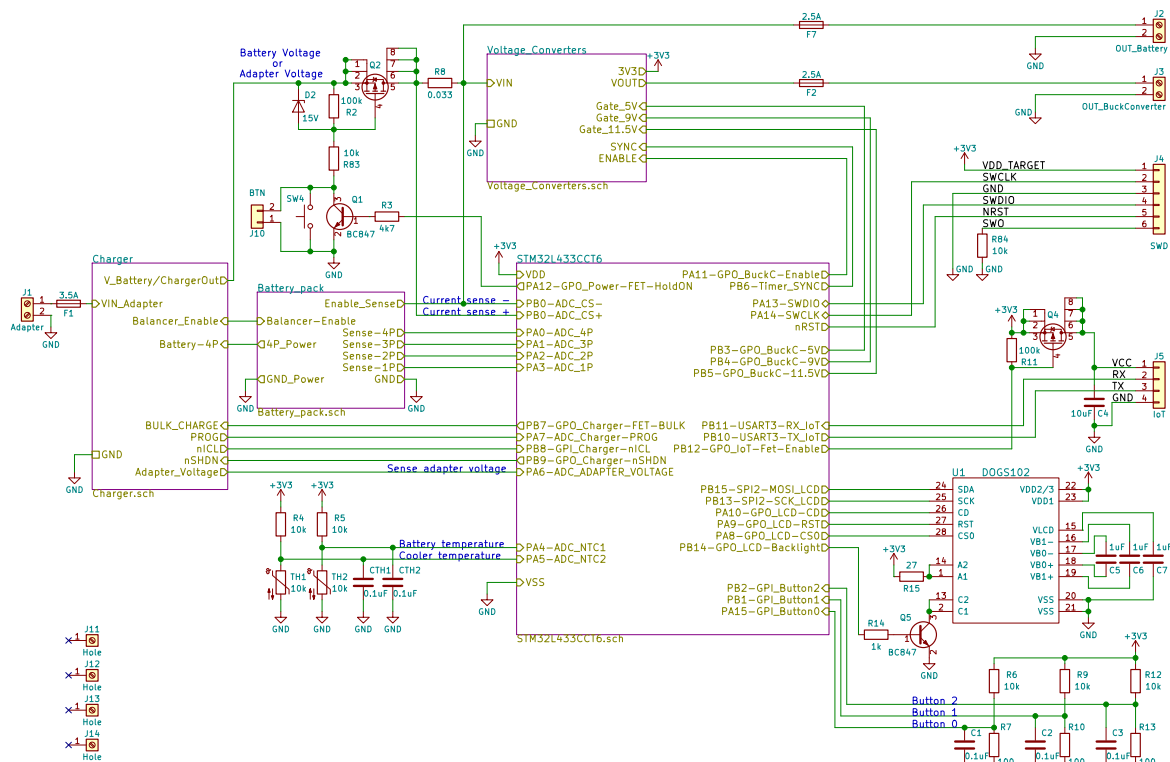


Obr. A.4: Zařízení se zapnutým menu (2. verze)

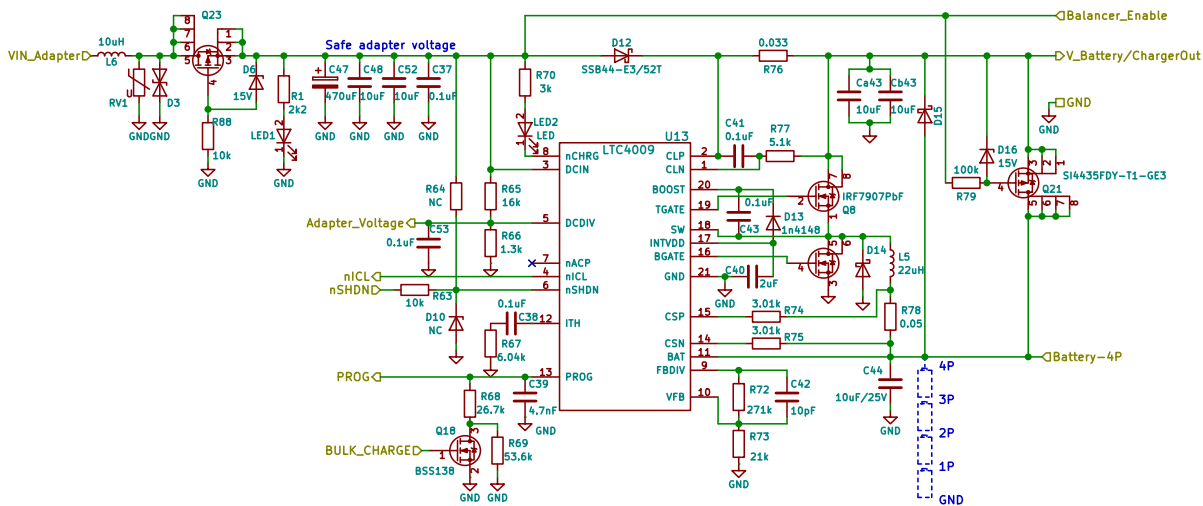


Obr. A.5: Osazená deska plošných spojů zařízení (1. verze)

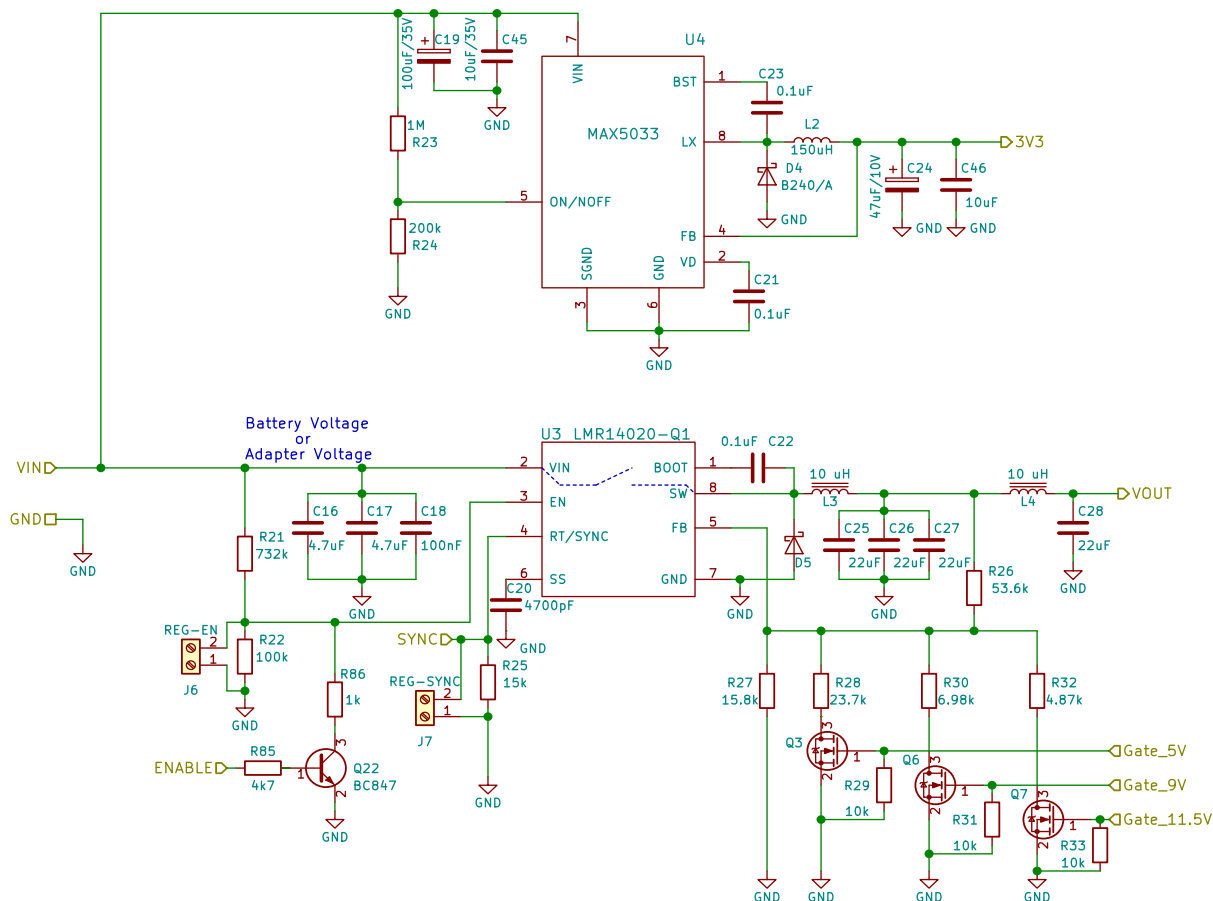
B Schéma zařízení



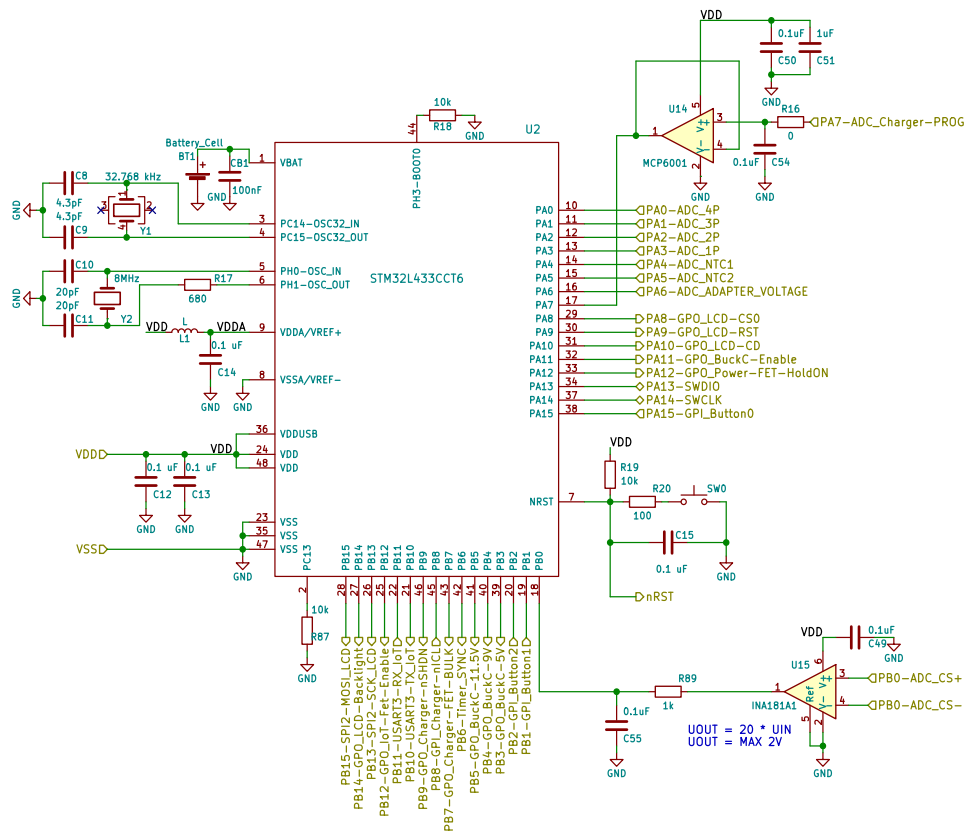
Obr. B.1: Celkové schéma zařízení (2. verze)



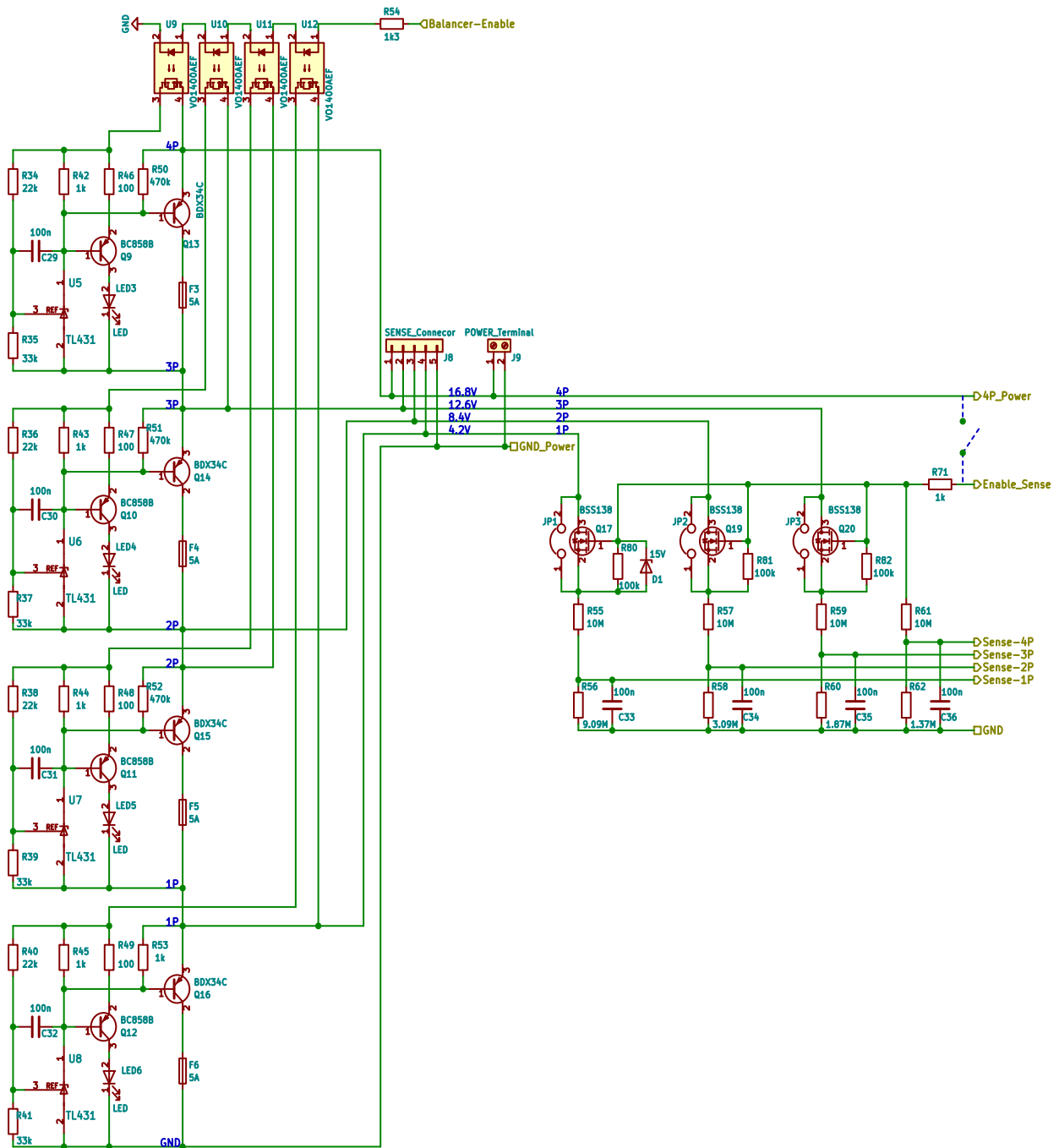
Obr. B.2: Schéma nabíječky článků, na Obr. B.1 blok Charger (2. verze)



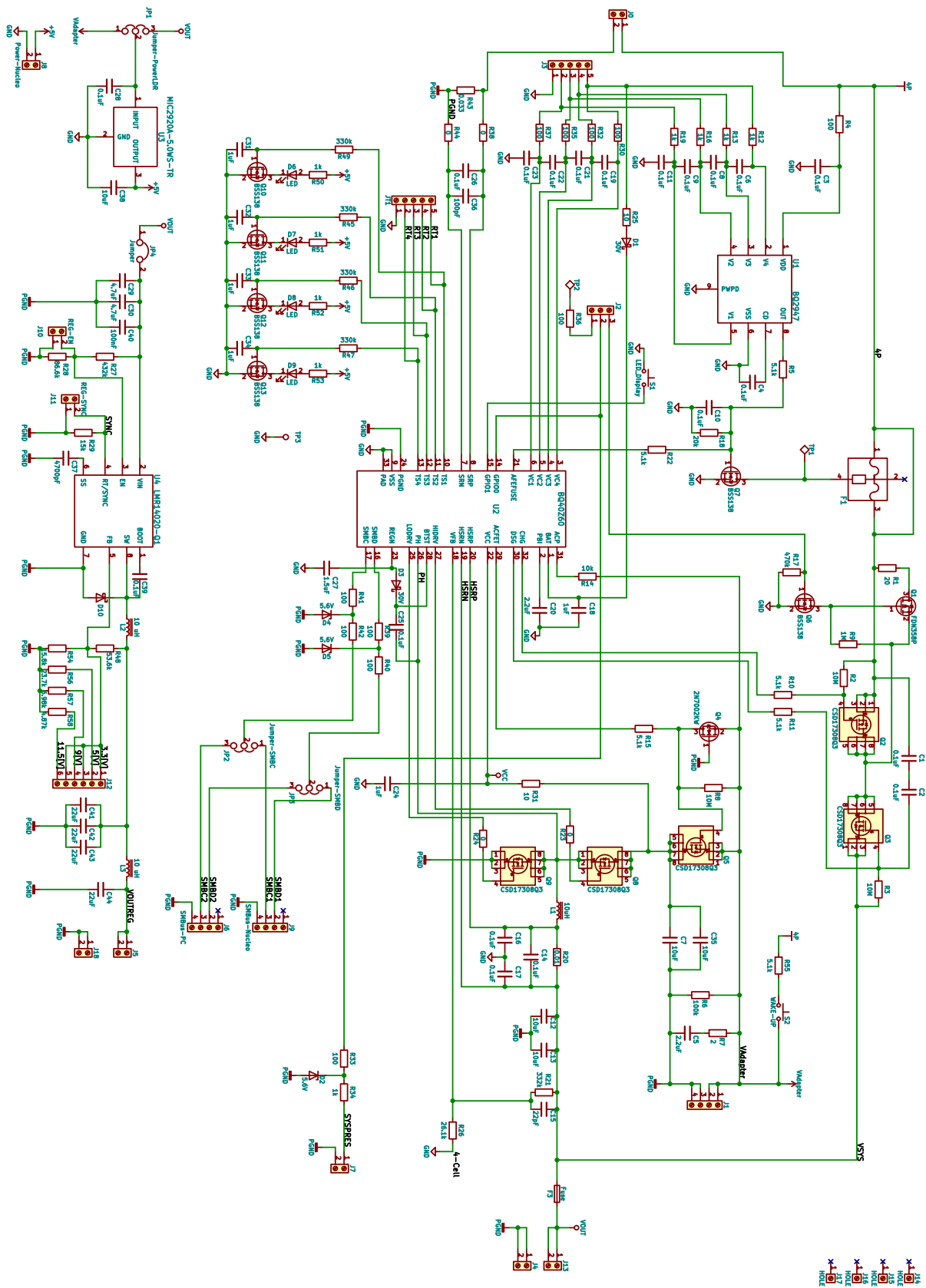
Obr. B.3: Schéma spínaných napěťových regulátorů, na Obr. B.1 blok *Converters* (2. verze)



Obr. B.4: Schéma zapojení mikrokontroléru, na Obr. B.1 blok *STM32L433CCT6* (2. verze)

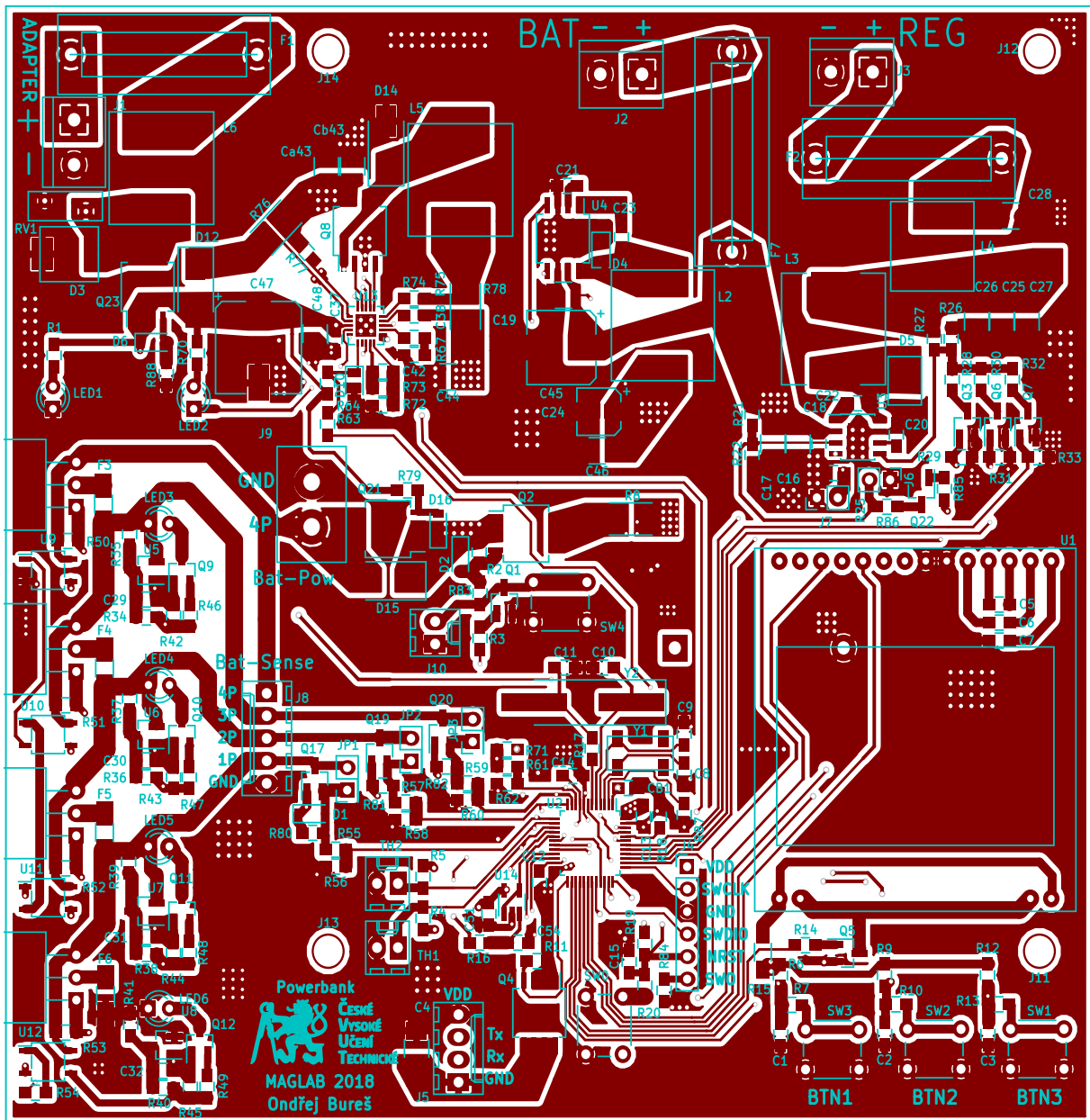


Obr. B.5: Schéma spínaných napěťových regulátorů, na Obr. B.1 blok *Battery pack* (2. verze)

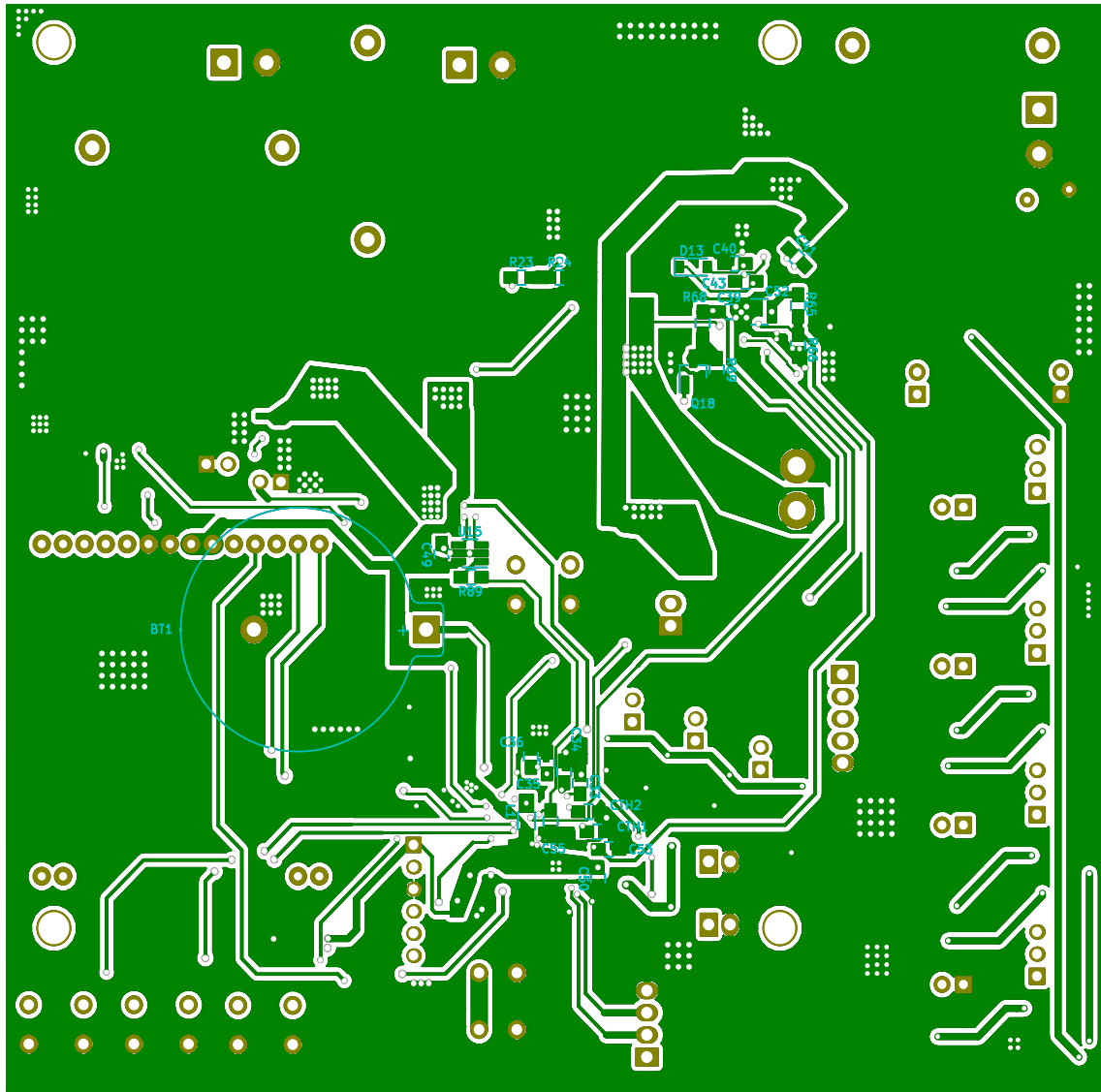


Obr. B.6: Celkové schéma zařízení (1. verze)

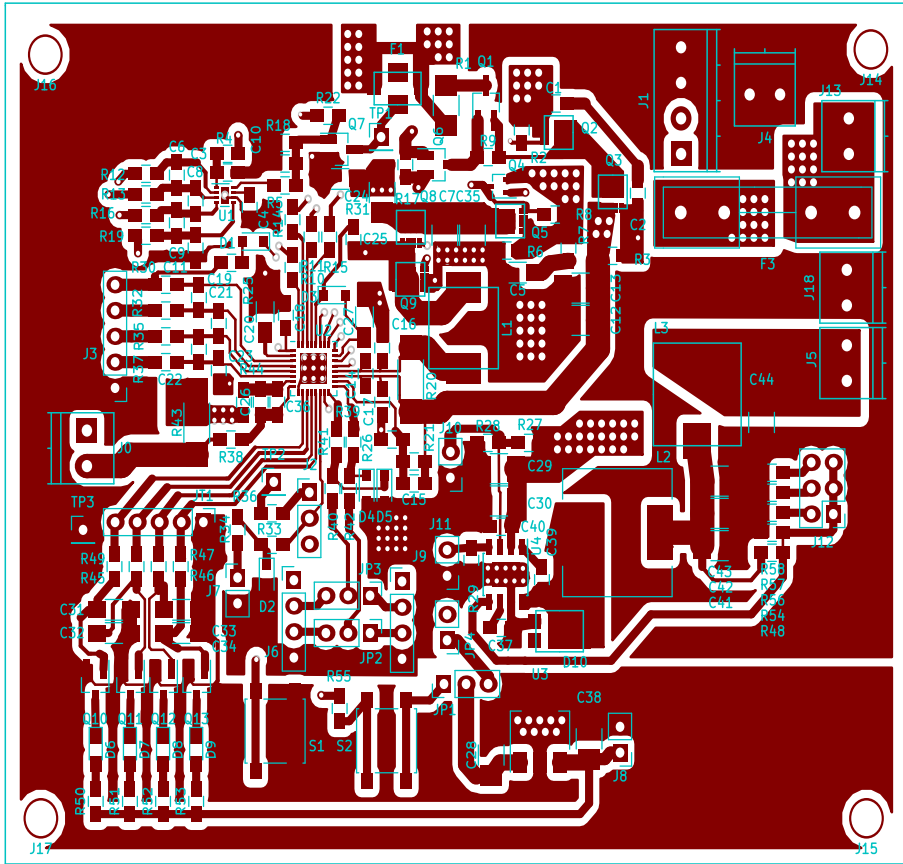
C DPS



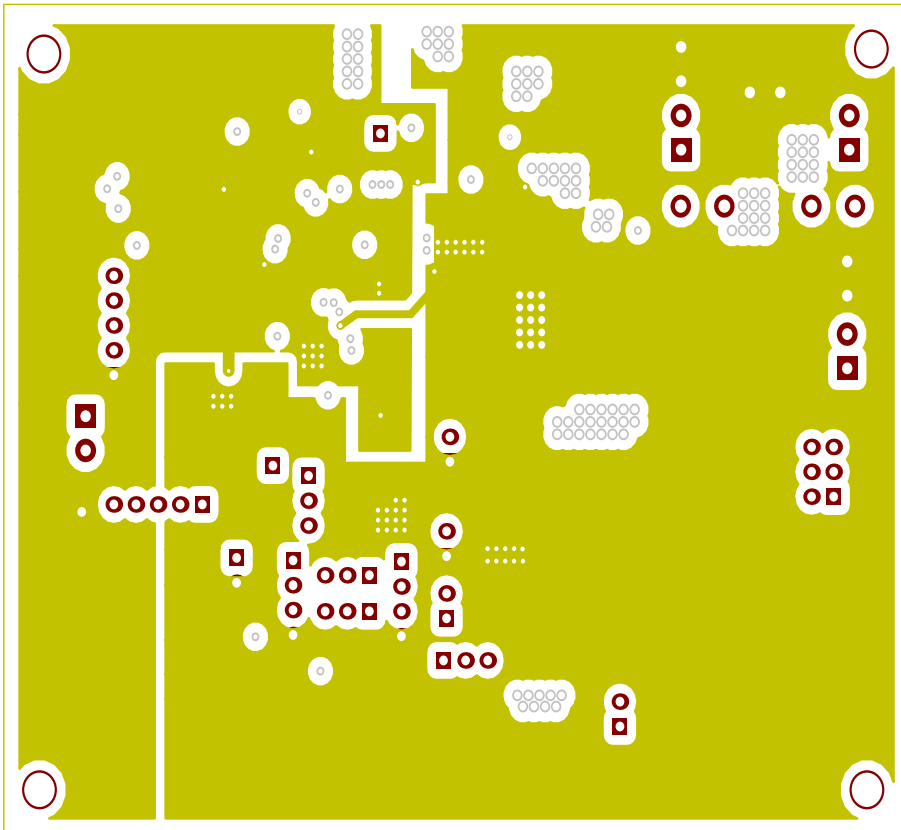
Obr. C.1: Vrstva TOP s potiskem (2. verze)



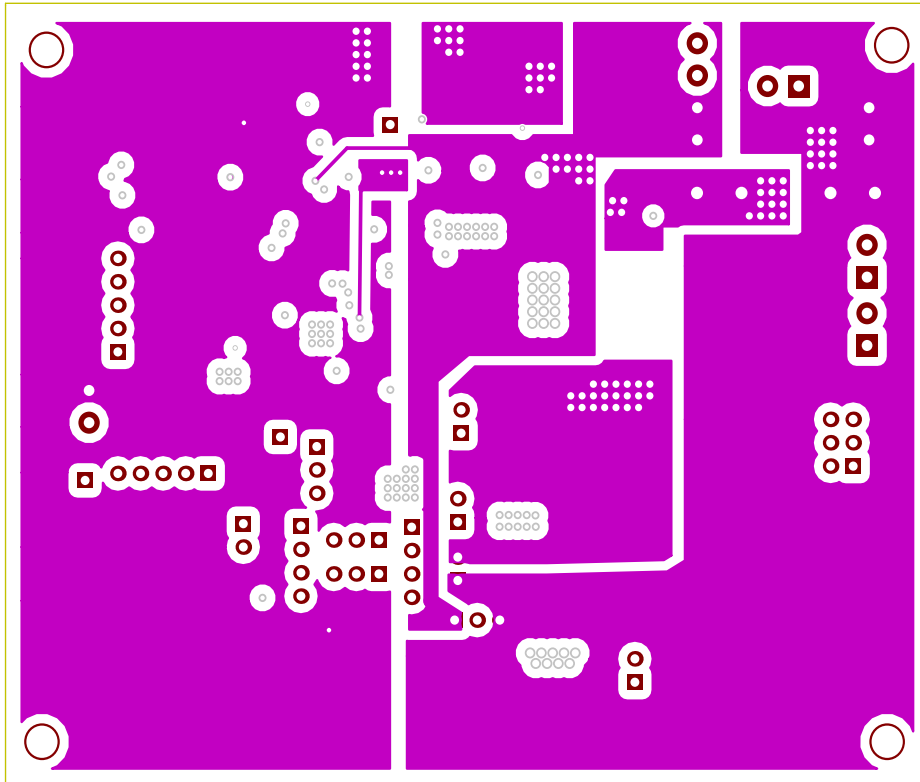
Obr. C.2: Vrstva BOT (2. verze)



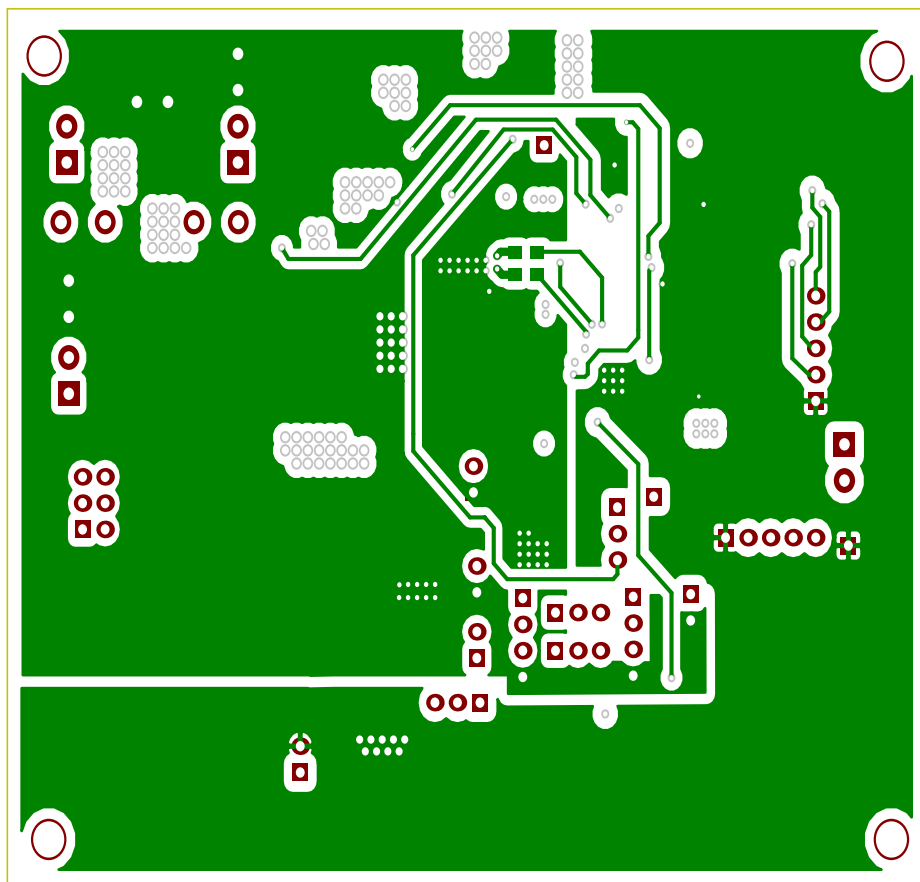
Obr. C.3: Vrstva TOP s potiskem (1. verze)



Obr. C.4: Vrstva IN1 (1. verze)



Obr. C.5: Vrstva IN3 (1. verze)



Obr. C.6: Vrstva BOT (1. verze)

D Obsah CD

Přiložené CD obsahuje:

- Elektronickou verzi této práce
- Zdrojový kód zařízení
- Schémata zapojení
- Navržené DPS
- Výrobní podklady DPS
- Seznam použitých součástek