

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Tester a simulátor akumulátorových baterií

diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Stanislava Papežová, CSc.

Autor práce: Bc. Petr Šebesta

PRAHA 2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Petr Šebesta

Informační a řídicí technika v agropotravinářském komplexu

Název práce

Tester a simulátor akumulátorových baterií

Název anglicky

Battery tester and simulator

Cíle práce

Cílem práce je návrh a realizace funkčního vzorku testeru a simulátoru akumulátorových baterií. Obsluha zařízení bude možná lokálně z panelu a přes počítač. Zařízení bude splňovat tyto parametry: provozní napětí 1 V až 21 V, maximální provozní proud 10 A.

Metodika

1. Seznamte se s chemickými a elektrickými vlastnostmi standardně používaných akumulátorů, porovnejte jejich vlastnosti, výhody a nevýhody a problémy spojené s řazením článků.
2. Navrhněte zařízení schopné testovat a simulovat akumulátorové baterie.
3. Realizujte funkční vzorek.
4. Prakticky ověřte funkčnost zařízení
5. Vyhodnoťte výsledky měření

Doporučený rozsah práce

50 – 60 stran

Klíčová slova

akumulátor, testování, simulace funkcí akumulátoru

Doporučené zdroje informací

CENEK, M. a kol. Akumulátory od principu k praxi. Praha, FCC Public 2003

Laboratorní napájecí zdroj a simulátor baterií. [online].

https://www.distrelec.cz/Web/Downloads/_t/ds/2281S_eng_tds.pdf

Microcontrollers & Microprocessors. [online].

https://my.st.com/content/my_st_com/en/products/microcontrollers-microprocessors.html#documentation

REDDY, T., LINDEN, D. Handbook of Batteries. McGraw-Hill Professional, 2010. ISBN: 007162421X

Seriál Co se děje v počítači. [online]. <https://www.root.cz/serialy/co-se-deje-v-pocitaci/>

VEDRAL, J., FISCHER, J. Elektronické obvody pro měřicí techniku. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02966-2.

Předběžný termín obhajoby

2021/2022 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Stanislava Papežová, CSc.

Garantující pracoviště

Katedra elektrotechniky a automatizace

Elektronicky schváleno dne 11. 1. 2021

doc. Ing. Miloslav Linda, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 2. 2021

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 13. 03. 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Tester a simulátor akumulátorových baterií vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne

.....
Bc. Petr Šebesta

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Stanislavě Papežové, CSc., za odborné vedení práce a cenné věcné připomínky.

Děkuji firmě Ryston Electronics s.r.o. za materiálovou podporu a za podnět, na jehož základě bylo toto zařízení vytvořeno.

Dále bych chtěl také poděkovat své rodině a svému kamarádovi Ing. Janu Vomočilovi, kteří mi byli oporou.

Bc. Petr Šebesta

Tester a simulátor akumulátorových baterií

Abstrakt: S rozvojem používání přenosných elektrických zařízení je čím dál větší tlak na účinný zdroj jejich energie a tudíž na vývoj čím dál efektivnějších elektrochemických článků. Při jejich vývoji je nutné otestovat vlastnosti různých technologií a měřit parametry vyrobených článků s důrazem na efektivitu jejich provozu a bezpečnost používání. Tato práce se zabývá vývojem testeru a simulátoru elektrochemických článků. Cílem práce je navrhnout a vytvořit spolehlivý a účinný testovací systém pro elektrochemické články, který dokáže přesně změřit testovaný článek a následně simulovat jeho vlastnosti vůči zařízení, které má být článkem napájeno. V práci je podrobně popsán vývoj navrhovaného zařízení, včetně programovatelného napájecího zdroje, elektronické zátěže a řídicího systému. Dále je navržena implementace, včetně výběru komponentů a návrhu desek plošných spojů, která byla pak realizována a testována a jsou zde popsány i opravy a optimalizace původního návrhu. Zkonstruované zařízení umožňuje otestování a simulaci článku o provozním napětí od 1V do 21 V a maximálním provozním proudem 10A. Tento tester a simulátor bateriových článků nabízí účinný, nákladově efektivní a spolehlivý prostředek pro hodnocení vlastností baterie, který je nezbytný pro vývoj a zlepšování bateriových technologií a jejich použitelnost pro různé aplikace.

Klíčová slova: akumulátor; testování; simulace funkcí akumulátoru

Battery tester and simulator

Summary: With the expansion of portable electrical devices, an increased emphasis is placed on their efficient power source and therefore, on the development of more effective electrochemical cells. During their development, it is necessary to test the properties of different technologies and to measure the parameters of the manufactured cells with an emphasis on their effective operation and their safety of use. This work is focused on the development of an electrochemical cell tester and simulator. The work aims to design and create a reliable and efficient system for cell testing. This system can precisely measure the tested cell and then simulate cell parameters toward the device to be powered. This work describes the development of the designed system, including a programmable power supply, electronic load, and controller system. Next, the implementation is proposed, including the selection of components and the design of printed circuit boards. The implemented design was tested; the corrections and optimization of the original design were described. The constructed device enables testing and simulation of a cell with an operating voltage from 1 V to 21 V and a maximal operating current of 10 A. This battery cell tester and simulator offers efficient, cost-effective, and reliable equipment to evaluate battery parameters, which is essential for the development and improvement of battery technologies and their usability to a broad range of applications.

Key Words: accumulator; testing; simulation of battery functions

Obsah

Úvod	1
Cíle práce	3
1 Baterie	5
1.1 Primární a sekundární články	7
1.2 Používané elektrochemické články	7
1.3 Elektrochemické články založené na olovu	8
1.4 Nabíjení olovených baterií	10
1.5 Elektrochemické články založené na lithiu	11
1.5.1 Lithium-iontové články	12
1.5.2 Lithium-polymerové články	13
1.5.3 Lithium-železo-fosfátové články	13
1.5.4 Lithium-titanové články	14
1.6 Nabíjení elektrochemických článků založených na lithiu	14
2 Problematika řazení článků do baterie a ochrana článků	17
2.1 Zapojení baterie s jednou buňkou	17
2.2 Baterie spojená ze sériově řazených článků	18
2.3 Vyvažování článků baterie	19
2.4 Baterie zapojená z paralelně řazených článků	21
2.5 Sérioparalelní kombinace	22
2.6 Vestavěné ochrany baterií	23
3 Návrh zařízení	25
3.1 Zdroj	25
3.2 Elektronická zátěž	27
3.2.1 Využití energie	28
3.3 Řídící obvody	28
3.4 Pomocné obvody	28
4 Realizace	29
4.1 Stanovení parametrů zařízení	29
4.2 Realizace	29
4.2.1 Před-regulátor	29
4.2.2 Regulátor	34
4.2.3 Zátěž	36
4.3 Řídící obvody	37

4.4	Pomocné obvody	38
5	Testování	41
5.1	Před-regulátor	41
5.2	Regulátor	45
5.3	Zátěž	46
5.3.1	Konstantní napětí (CV)	46
5.3.2	Konstantní proud (CC)	46
5.4	Ovládání zařízení	46
	Závěr	49
	Přílohy	54
A	Obrázky desek plošných spojů	55
B	Schémata modulů zařízení	61

Seznam obrázků

1.1	Konstrukce baterie [25]	6
1.2	Příklad životnosti olovené gelové baterie v závislosti na hloubce vybití (D.O.D) [15]	9
1.3	Nabíjecí charakteristika nabíječky EXTOL PREMIUM [16]	11
1.4	Chemické reakce v Li-ion článcích [18]	12
1.5	Schéma baterie LiFePO_4 [38]	13
1.6	Nabíjecí charakteristika čipu NC3791 určeného pro Li-ion baterie[2] .	15
2.1	Zapojení baterie s jedním článkem (1S) [17]	17
2.2	Baterie složená z 4 článků zapojených do série (4S)[17]	18
2.3	Zapojení 4S s článkem větší kapacity [17]	19
2.4	Baterie s nevyváženými články (dva články jsou již plně nabitě) . . .	19
2.5	Baterie s nevyváženými články (dva články jsou již plně vybitě)[37] .	19
2.6	Příklad obvodu pasivního balanceru [33]	20
2.7	Příklad obvodu aktivního balanceru [27]	20
2.8	Baterie složená z 4 článků zapojených paralelně (4P) [17]	21
2.9	Zapojení 4P s článkem menší kapacity [17]	21
2.10	Připojení článků sloužící i jako pojistky v baterii z automobilu TESLA [36]	22
2.11	Sérioparalelní kombinace 4SP2 [17]	22
2.12	Příklad CID a TPC ochrany [10]	23
3.1	Blokové schéma topologie s transformátorem a lineárním regulátorem	26
3.2	Blokové schéma topologie se spínaným regulátorem	26
3.3	Blokové schéma kombinace topologie spínaného zdroje a lineárního regulátoru	27

4.1	Základní schéma buck měniče [12]	30
4.2	Schéma synchronní buck s průběhy spínání S1, S2 a průběhem proudu cívky	31
4.3	Závislost výstupního zvlnění V_{RAMP} , při různých výstupních napětích, na odporu R_X při hodnotách $C_X = 22 \text{ nF}$ a $C_Y = 3,9 \text{ nF}$	32
4.4	Ovládání výstupního napětí před-regulátoru	33
4.5	Blokové schéma regulátoru	34
4.6	Zjednodušené schéma napěťové regulační smyčky	35
4.7	Zjednodušené schéma proudové regulační smyčky	35
4.8	Schema slučovacího členu	35
4.9	Zjednodušené schema zátěže CC	37
4.10	Zjednodušené schéma zátěže CV	37
4.11	Princip nábojové pumpy [28]	39
5.1	Výstupní šum před-regulátoru ($2 \mu\text{s}/\text{dílek}$, $100 \text{ mV}/\text{dílek}$)	42
5.2	Spínání S2 tranzistoru ($500 \text{ ns}/\text{dílek}$, $1 \text{ V}/\text{dílek}$)	42
5.3	Závislost výstupního zvlnění napětí na výstupním proudu	43
5.4	Porovnání původního nastavení předpětí regulátoru a nového nastavení	44
5.5	Účinnost před-regulátoru v závislosti na výstupním proudu	44
5.6	Snímek z termokamery dlouhodobě zatíženého před-regulátoru (obarveno dle teploty)	45
5.7	Výstupní zvlnění regulátoru ($500 \text{ ns}/\text{dílek}$, $50 \text{ mV}/\text{dílek}$)	46
5.8	Kmitání zátěže CV bez RC článku ($2 \text{ ns}/\text{dílek}$, $200 \text{ mV}/\text{dílek}$)	47
5.9	Kmitání zátěže CV s RC článku ($2 \text{ ns}/\text{dílek}$, $10 \text{ mV}/\text{dílek}$)	47
5.10	Kmitání zátěže CC bez úprav ($20 \mu\text{s}/\text{dílek}$, $200 \text{ mV}/\text{dílek}$)	48
5.11	Kmitání zátěže CC bez úprav ($20 \mu\text{s}/\text{dílek}$, $100 \text{ mV}/\text{dílek}$)	48
A.1	PCB před-regulátoru	56
A.2	PCB regulátoru	57
A.3	PCB zátěže	58
A.4	PCB řídicího modulu	59
B.1	Schéma před-regulátoru	62
B.2	Schéma regulátoru 1/4	63

B.3	Schéma regulátoru 2/4	64
B.4	Schéma regulátoru 3/4	65
B.5	Schéma regulátoru 4/4	66
B.6	Schéma zátěže 1/2	67
B.7	Schéma zátěže 2/2	68
B.8	Schéma řídicího modulu	69

Úvod

Svět, ve kterém dnes žijeme, je téměř výhradně závislý na elektrické energii. Zařízení napájená z baterií se stala nedílnou součástí našich životů, od napájení chytrých telefonů, přes elektrická auta, až po velká energetická úložiště. Baterie však nejsou dokonalé, mají různé vlastnosti, časem se mohou znehodnotit a ztratit schopnost udržet energii. Tato degradace je ovlivněna mnoha faktory, například chemickým složením článků použitých v baterii. Proto je přesné testování elektrochemických článků a jejich simulace klíčová pro identifikaci a zlepšení výkonu, spolehlivosti a bezpečnosti samotné baterie i napájeného zařízení.

Chemické složení elektrochemických článků je rozhodující pro jejich vlastnosti. Elektrochemické články se skládají ze dvou elektrod a roztoku elektrolytu. Když je baterie nabitá, vnější obvod umožňuje tok elektronů od záporné elektrody ke kladné elektrodě. Tento tok elektronů uvolňuje energii uloženou v baterii. Během nabíjení se tok elektronů obrátí a baterie ukládá energii. Různé typy elektrochemických článků používají různé materiály pro své elektrody a roztoky elektrolytů. Například lithiium-iontové baterie používají oxid lithný a kobaltnatý pro kladnou elektrodu a grafit pro zápornou elektrodu, zatímco olovené baterie používají oxid olovnatý pro kladnou elektrodu a olovo pro zápornou elektrodu.

K přesnému měření a analýze výkonu elektrochemických článků je zapotřebí specializované zařízení na testování bateriových článků. Testery a simulátory baterií jsou navrženy tak, aby poskytovaly přesná měření různých parametrů baterie, například napětí, proud, kapacitu a vnitřní odpor. Tato měření lze použít k vyhodnocení výkonu baterií v různých podmínkách, jako jsou různé teploty, rychlosti vybíjení a nabíjecí cykly. Simulátory bateriových článků mohou navíc simulovat chování baterie za různých podmínek, což umožňuje přesnější testování vlastností bateriově napájených zařízení.

Implementace zařízení pro testování a simulaci bateriových článků vyžaduje pečlivé plánování a provádění. Proces testování obvykle zahrnuje vícenásobné nabíjení a vybíjení baterie, přičemž se měří různé parametry pro posouzení jejího výkonu. Výsledky těchto testů pak lze použít k identifikaci problémů s baterií a optimalizaci jejich vlastností. Kromě toho lze zařízení na testování bateriových článků použít k ověření výkonu bateriově napájených zařízení a zajistit, že splňují specifické požadavky na výkon, spolehlivost a bezpečnost.

Lze říci, že testování a simulace bateriových článků jsou zásadní pro zlepšení výkonu, spolehlivosti a bezpečnosti baterie. Chemické složení elektrochemických článků hraje kritickou roli v jejich výkonu a pro přesné měření a analýzu jejich chování je za-

potřebí specializované testovací zařízení. Díky přesnému testování a simulaci mohou výrobci baterií vyvinout lepší baterie a účinnější zařízení. Koncoví uživatelé si mohou být jisti, že baterie napájející jejich zařízení jsou bezpečné, spolehlivé, účinné a zařízení je využívá v optimálním režimu. Testování vlastností baterií a akumulátorů je zdlouhavé, protože je nutné modelovat celý pracovní cyklus nabíjení a vybíjení, případně všechny předpokládané způsoby používání. Jedná se o impulzní provoz nabíjení i vybíjení. Sledování provozu znamená neustálou kontrolu, nastavování příslušných parametrů a neustálé odečítání naměřených hodnot. Je zřejmé, že uvedená činnost je velmi drahá, a proto značně neefektivní. Zlepšení vlastností takové činnosti je v její automatizaci, výhodné je využití počítače s příslušnými řídicími a měřicími programy.

Opačný proces, simulace reálné baterie elektronickým zařízením, je z hlediska efektivnosti velmi výhodné, protože je možné v krátké době modelovat nejrůznější režimy funkce a jejich vliv na napájeného zařízení. V případě využití reálné baterie to znamená delší nebo i neúnosně dlouhé čekání do dosažení požadovaného stavu.

Cíle práce

Cílem práce je navrhnout a realizovat funkční vzorek testeru a simulátoru akumulátorových baterií a otestovat jeho funkčnost.

Zařízení bude splňovat tyto parametry:

- Provozní napětí 1-21 V
- Maximální provozní proud 10 A
- Obsluha zařízení bude možná lokálně z panelu i přes počítač

Dílčí cíle:

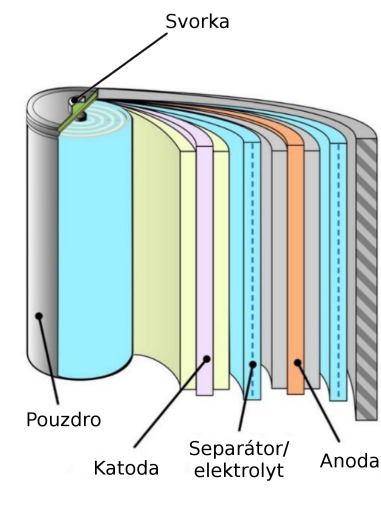
1. Porovnání elektrických a chemických vlastností standardně používaných akumulátorů, jejich výhod a nevýhod. Popis problémů spojených s řazením článků.
2. Návrh vlastního zařízení schopného testovat a simulovat akumulátorové baterie.
3. Realizace funkčního vzorku.
4. Ověření funkčnosti zařízení.
5. Vyhodnocení výsledků měření.

Kapitola 1

Baterie

Baterie jsou elektrochemická zařízení, realizující přeměnu chemické energie na energii elektrickou. Baterie se využívají v celé řadě aplikací jak v běžném životě, tak v průmyslu. V běžném životě se s nimi setkáme nejčastěji v přenosné elektronice jako jsou hodinky, mobilní telefony, tablety, notebooky, a jiná přenosná zařízení. Také se s bateriemi setkáváme například ve svítilnách, hračkách, dálkových ovladačích, nebo v ručním nářadí. Baterie se využívají i k napájení dopravních prostředků, ať už se jedná o vysokozdvizné vozíky v průmyslu nebo o baterie, které slouží jako zdroj energie pro osobní automobily. Velkým tématem je také skladování energie získané z obnovitelných zdrojů, jako jsou solární panely nebo větrné turbíny. Další využití baterií je pro záložní zdroje, které chrání kritickou infrastrukturu před výpadkem energie. Jedná se zejména o nemocnice, datová centra a o bezpečnostní systémy. Samostatnou kategorií je napájení vojenské techniky a techniky určené pro vesmírné programy.

Baterie se skládá z jednoho nebo více elektrochemických článků. Elektrochemické články se obvykle skládají z elektrod, separátoru, elektrolytu, pouzdra a svorek viz obr. 1.1. V případě obrázku je druhá svorka připojena na pouzdro a elektrolyt je nasáklý do separátoru.



Obrázek 1.1: Konstrukce baterie [25]

Elektrody jsou základem elektrochemického článku. Každý článek obsahuje dvě elektrody, anodu a katodu. Při zapojení článku do obvodu dochází k chemické reakci, která ovládá tok elektronů mezi anodou a katodou. Působením vnějšího obvodu, kde je článek zapojen, proudí elektrony od anody ke katodě. Při provozu článku dochází na anodě k oxidaci, tedy odevzdávání elektronů, které proudí do vnějšího obvodu. Vhodné materiály pro anodu jsou takové, které mohou snadno odevzdat elektrony, například zinek, grafit, nebo stále častější lithium. Na katodě dochází k redukci a elektrony jsou přijímány z vnějšího obvodu. Vhodné materiály jsou například oxid mangančitý, nebo oxid lithný. [3]

Separátor si lze představit jako membránu mezi anodou a katodou sloužící k oddělení elektrod. Separátor také umožňuje průchod iontů, obsažených v elektrolytu. Ionty uzavírají elektrický okruh při průchodu proudem. Separátor sám se neúčastní žádné chemické či elektrické reakce, ale výrazně ovlivňuje vlastnosti elektrochemického článku. Materiál separátoru je velmi závislý na konkrétním druhu elektrochemického článku. Typicky se využívají materiály jako celulozový papír, polymery, skelná vata, oxid křemičitý, nebo keramika. V některých starších bateriích separátor není a k oddělení anody a katody se využívá mechanické uspořádání elektrod. [31, 32]

Elektrolyt v elektrochemických článcích umožňuje pohyb iontů mezi elektrodami. Kromě usnadnění elektrochemických reakcí slouží elektrolyt ke zlepšení odvodu tepla z článku. Elektrolyt je obvykle sůl nebo kyselina rozpuštěná v rozpouštědle. Rozpouštědlo může být voda, nebo organická rozpouštědla. V baterii je elektrolyt ve formě tekutiny, nasáklý do separátoru, nebo ve formě gelu. [8]

Pouzdra slouží jako ochranný kryt pro elektrochemické články a odděluje vnitřní prostředí článku od vnějšího a zabraňuje případné interakci mezi nimi. Umožňuje také upevnění svorek baterie, které propojují elektrický obvod z vnitřku baterie do vnějšího obvodu a umožňují článku dodávat energii. Pouzdra bývají vyrobená z kovu nebo odolného plastu. Svorky se vyrábí z vodivého materiálu typicky kovu.

1.1 Primární a sekundární články

Základní rozdíl mezi primárními a sekundárními články je, že primární články jsou určeny pro jednorázové použití, zatímco sekundární články lze dobíjet.

Primární články mají malé samovybíjení a lze je skladovat po dlouhou dobu. Typicky ale nejsou schopné dodávat velké proudy. Využívají se v aplikacích, kde je vyžadovaná dlouhá životnost a malé proudy. Samotný provoz primárních článků je nenáročný na údržbu a jsou schopné pracovat až do úplné ztráty napětí. Efektivita primárních článků je velmi malá, na výrobu je nutné spotřebovat asi 50x více energie než je možné později získat. Využívají se například pro zálohování pamětí, detektory kouře a dálkové ovladače. Obecně se primární články považují za neekologické a vytlačují je články sekundární. Existují sice pokusy o prodloužení jejich životnosti dobíjením malými proudy, ale obecně nejsou příliš efektivní a výrobci primárních článků tyto praktiky zakazují. Primární článek se vybitím zcela znehodnotí. [29]

Sekundární články, častěji označované jako akumulátory, lze dobíjet z vnějšího zdroje opakovaně. To činí sekundární články nákladově efektivnější než primární články. Oproti primárním článkům je nezbytné provozovat sekundární články přesně za podmínek, pro které byly vyrobeny a které odpovídají chemickému složení. Pokud se tyto podmínky nedodrží, může dojít k velmi rychlé degradaci.

1.2 Používané elektrochemické články

Standardně používané elektrochemické články dělíme podle materiálů, ze kterých jsou složeny. Nejčastěji se setkáváme s lithiovými články (40 %) a to zejména ve spotřební elektronice. Baterie složené z lithiových článků nalézají své uplatnění i v jiných oborech. Nejvýznamnější jsou dnes zřejmě bateriová úložiště a baterie elektrických automobilů. [6]

Druhým nejvíce zastoupeným materiálem pro výrobu článků je olovo (33 %), které se využívá ve startovacích bateriích. Svě uplatnění také nalézá jako stacionární baterie v záložních zdrojích nebo jako trakční baterie, například v golfových vozících. Tyto segmenty využití však pomalu nahrazují lithiové články díky lepším provozním vlastnostem. [6]

Primární články tvoří poslední významnou část (21 %) používání baterií. Jedná se o jednorázové články využívající reakci zinku a oxidu manganičitého (15 %), nebo reakci zinku a uhlíku (6 %). [6, 4]

Dnes již téměř bez významu jsou baterie Nikl-metal hydrid (3 %) a Nikl-kadmium (2 %). Poslední procento zastávají zejména velmi staré baterie, například Nikl-železové baterie, Stříbro-zinkové baterie, nebo baterie nikl-vodík používané pro vesmírná zařízení. [6]

Stav odpovídá září 2020. [6]

V následujícím textu se budu věnovat pouze sekundárním článkům založeným na lithiu a olovu, jakožto zástupcům standardně používaných článků.

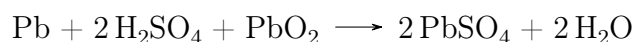
1.3 Elektrochemické články založené na olovu

Elektrochemický článek založený na olovu se skládá ze dvou olovených elektrod ponořených do roztoku kyseliny sírové jako elektrolytu. Díky své dobré spolehlivosti a nízké ceně je v dnešní době využíván v mnoha oblastech. Díky dlouhodobému vývoji olovených akumulátorů je také možné vybrat akumulátor upravený speciálně na požadovaný provoz s optimální životností.

Samotné elektrody nejsou vyrobeny z čistého olova. Do olova se přidávají pomocné látky, které zajišťují mechanickou pevnost a zlepšují vlastnosti baterie. Uspořádání desek je závislé na zamýšleném použití. Například pro automobilový průmysl se využívá velké množství tenkých pórovitých desek, což zajišťuje velmi malý vnitřní odpor, tedy velké startovací proudy. Tato vlastnost je na úkor snížení kapacity na objem a váhu. Oproti tomu trakční olovené baterie mají silné elektrody, které zajišťují mechanickou odolnost a trvalý ale menší proud. [7, 35]

Elektrolytem je v olovených bateriích roztok kyseliny sírové (cca 35 %). Podle použití může být roztok v tekuté formě, nasáknutý do skelných vláken, nebo ve formě gelu.

Olovený elektrochemický článek využívá chemickou reakci mezi elektrodami olova a oxidu olovnatého, za přítomnosti kyseliny sírové jako elektrolytu. Při vybíjení se materiál elektrod přeměňuje na síran olovnatý. Elektrolyt je ochuzován o kyselinu sírovou a obohacován o vodu. Celkově lze reakci zapsat: [35]



Při nabíjení probíhají reakce obráceně.

Olovené baterie mají nominální napětí 2,1 V na článek. Ukončovací nabíjecí napětí je 2,41 - 2,48 V na článek. Ukončovací vybíjecí napětí je 1,75 V. Tyto hodnoty napětí jsou obecně doporučované hodnoty při okolní teplotě 25 °C. Nicméně maximální nabíjecí napětí i minimální vybíjecí jsou závislé na okolnostech, zejména na vybíjecím proudu a okolní teplotě. Rozdíl je i v použití. Výše zmíněné hodnoty platí pro cyklické použití, tedy pro opakované nabíjení a vybíjení. Baterie využívané v záložních zdrojích, ve staničním režimu, jsou zpravidla používány velmi nárazově, v některých případech uplynou roky, než je nutné z baterie odčerpávat energii. Pro tento provoz je doporučené nabíjecí napětí napětí o něco nižší 2,26 - 2,30 V, než při cyklickém provozu. V tabulce 1.1 jsou doporučená ukončovací nabíjecí napětí v závislosti na použití a teplotě. V tabulce 1.2 jsou doporučená ukončovací vybíjecí napětí v závislosti na proudu pro olovené baterie výrobce GOOWEI ENERGY. [15]

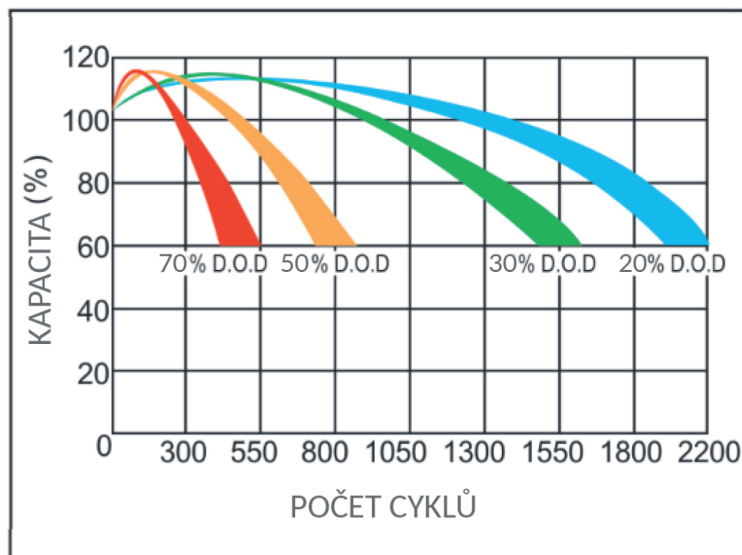
Tabulka 1.1: Doporučená nabíjecí napětí olovených baterií [15]

Teplota/°C	Nabíjecí napětí na článek/V			
	35	25	10	0
Cyklické použití	2,36 - 2,43	2,41 - 2,48	2,48 - 2,55	2,53 - 2,60
Staniční režim	2,21 - 2,25	2,26 - 2,30	2,33 - 2,37	2,38 - 2,42

Tabulka 1.2: Doporučená ukončovací vybíjecí napětí olověných baterií [15]

Ukončovací vybíjecí napětí/V	2,02	1,75	1,70	1,60	1,30
Vybíjecí proud/A	<0,1C	0,1C - 0,2C	0,2C - 0,5C	0,5C - 1C	>1C

Životnost olověné baterie se udává v závislosti na hloubce vybití (D.O.D = depth of discharge). Hloubka vybití udává kolik procent energie bylo z baterie odebráno a zase dodáno do plného nabití. Při nižším ukončovacím vybíjecím napětím, tedy větší D.O.D, dochází k výraznému opotřebení článků a tím ke snížení množství cyklů. Obecně platí čím méně se baterie vybíjí tím má delší životnost. Příklad lze vidět na obr. 1.2. [15]



Obrázek 1.2: Příklad životnosti olověné gelové baterie v závislosti na hloubce vybití (D.O.D) [15]

Olověné baterie pro menší kapacity jsou dodávány složené z několika článků. Typicky se jedná o 3 články pro 6 V, nebo častěji o 6 článků pro 12 V. Pokud spojujeme články, respektive baterie, do série, je nutné, aby měly stejné vlastnosti a byly stejně nabitě. Takto spojené články není nutné balancovat. Při nedodržení těchto podmínek je nezbytně nutné hlídat napětí jednotlivých článků, respektive baterií, a zabránit nadměrnému vybití nebo přebití kteréhokoli z nich. Výsledná baterie má pak kapacitu odpovídající kapacitě nejslabšího článku. Baterie složené z olověných článků pro malé kapacity jsou dnes již většinou bezúdržbové, pro větší kapacity, řádově stovky ampérhodin, je nutné dolévat destilovanou vodu. Tyto baterie ale mají výrazně vyšší životnost a odolnost proti hlubokému vybití než bezúdržbové.

1.4 Nabíjení olověných baterií

Nabíjení olověné baterie je možné podle několika typů základních charakteristik - nabíjení konstantním napětím, nabíjení konstantním proudem a nabíjení pulzním proudem. [40]

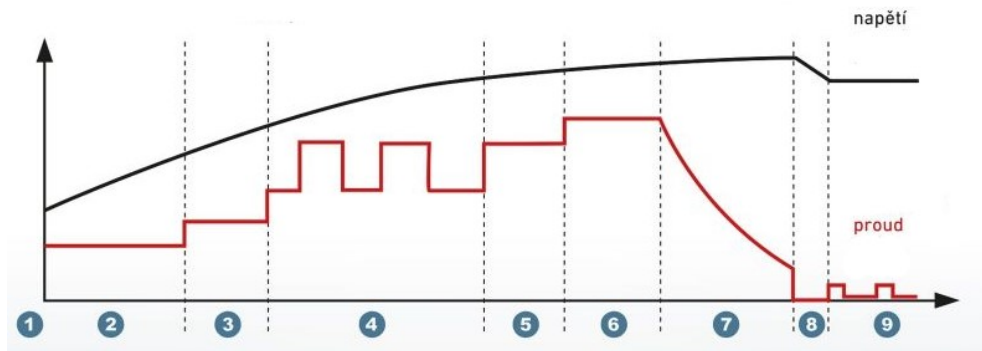
Nabíjení konstantním napětím v podstatě nabíjíme zdrojem napětí nastaveným na ukončovací nabíjecí napětí. Nabíjení začíná velkým proudem, který je dán hloubkou vybití a vnitřním odporem akumulátoru. Jak se nabíjením akumulátoru zvyšuje svorkové napětí, proud klesá. Konečný proud se ustálí na malé hodnotě, která odpovídá udržovacímu proudem. Výhodou je rychlé nabití baterie na přibližně 80% její kapacity. Při této úrovni nabití stoupne napětí akumulátoru tak vysoko, že výrazně omezí nabíjecí proud a zbylá kapacita se nabíjí velmi pomalu. Nehrozí zde přebíjení, protože zdroj napětí je nastaven na ukončovací napětí. Při tomto způsobu nabíjení je nutné minimálně v počátečních velkých nabíjecích proudech hlídat teplotu elektrolytu, která by neměla přesáhnout 40 °C. [29]

Nabíjení konstantním proudem je realizováno připojením baterie na zdroj proudu. Zdroj proudu je obvykle nastaven na 0,08 až 0,1 násobek kapacity baterie. Při nabíjecím proudem 0,1 násobku kapacity je doba nabíjení vybité baterie přibližně 10 až 14 hodin v závislosti na stavu. Množství uložené energie vzrůstá lineárně s nabíjecím časem. Nabíjení je možné ukončit po určité době. To však může vést k přebití baterie, pokud není zcela vybitá. Lepší variantou je měření svorkového napětí baterie a odpojit nabíjení při dosažení ukončovacího napětí. Nevýhodou je konečný dobíjecí proud, který je stejně velký jako počáteční. To může vést k přebíjení. [29]

Nabíjení pulzním proudem je varianta nabíjení konstantním proudem, kde se opakují cykly nabíjení a malého vybíjení. Tento způsob nabíjení má o něco vyšší účinnost a prodlužuje životnost olověných článků.

Výše popsané charakteristiky se v reálných případech samostatně nepoužívají. Místo toho nabíječky využívají kombinaci nabíjecích charakteristik. Příkladem je nabíječka EXTOL PREMIUM, jejíž nabíjecí charakteristika je na obr. 1.3. Jedná se již o relativně sofistikovanou nabíječku, která je schopná svým nabíjecím cyklem optimalizovat rychlost nabíjení i životnost baterie. Charakteristika je rozdělena na devět částí. V první fázi nabíječka měří připojenou baterii. V této fázi se například určuje zda se jedná o 6 V nebo 12 V baterii. Ve fázi dvě, tři, pět a šest dochází k nabíjení baterie konstantním proudem. Ve fázi čtyři se baterie nabíjí konstantním pulzním proudem. Fáze sedm je varianta charakteristiky nabíjení konstantním napětím. Fáze osm slouží ke kontrole stavu baterie a fáze devět je udržovací režim. [16]

Standardně se při provozu olověných baterií nevyžaduje přesné měření jednotlivých článků baterie.



Obrázek 1.3: Nabíjecí charakteristika nabíječky EXTOL PREMIUM [16]

1.5 Elektrochemické články založené na lithiu

Elektrochemické články na bázi lithia jsou dnes široce používány pro jejich dobré vlastnosti, jako vysoká hustota uložené energie, nízké samovybíjení, dobrá životnost a velké množství pracovních cyklů. Existuje velká řada typů lithiových článků lišící se vlastnostmi podle použití.

Lithium je vhodný prvek pro výrobu elektrochemických článků zejména díky svým jedinečným chemickým vlastnostem. Lithium je vysoce reaktivní kov, který se snadno vzdává svého nejvzdálenějšího elektronu za vzniku kladného iontu (Li^+). Tato vlastnost umožňuje lithiu fungovat jako vynikající anodový materiál v elektrochemických článcích, kde může snadno ztrácet elektrony a uvolňovat energii. Další důležitou vlastností lithia je jeho nízká atomová hmotnost, což z něj činí nejlehčí kov. Díky této vlastnosti je lithium ideální pro použití v přenosných elektronických zařízeních, kde je kritická nízká hmotnost a kompaktní velikost. Lithiové články jsou navíc schopné produkovat vysoké napětí při vysoké hustotě energie. [21, 22, 23]

Články založené na lithiu jsou obvykle konstruovány stejně jako ostatní elektrochemické články - skládají se z katody, anody, elektrolytu a separátoru. Materiál anody je obvykle na bázi uhlíku, například grafit. Katoda se typicky skládá z podvojného oxidu lithia a kovu, například dioxid lithno-kobaltitý (LiCoO_2), nebo tetraoxid lithno-manganito-manganičitý (LiMn_2O_4). Další používaná sloučenina je fosforečnan lithno-železnatý (LiFePO_4). [22, 23]

Vlastnosti článku se dramaticky mění v závislosti na použitém materiálu. Při používání je tedy nutné přesně znát provozní vlastnosti. Elektrolyt lithiových článků je obvykle roztok lithných solí v organickém rozpouštědle. Separátorem je nejčastěji membrána na bázi polyethylenu nebo polypropylenu. [11, 22, 23]

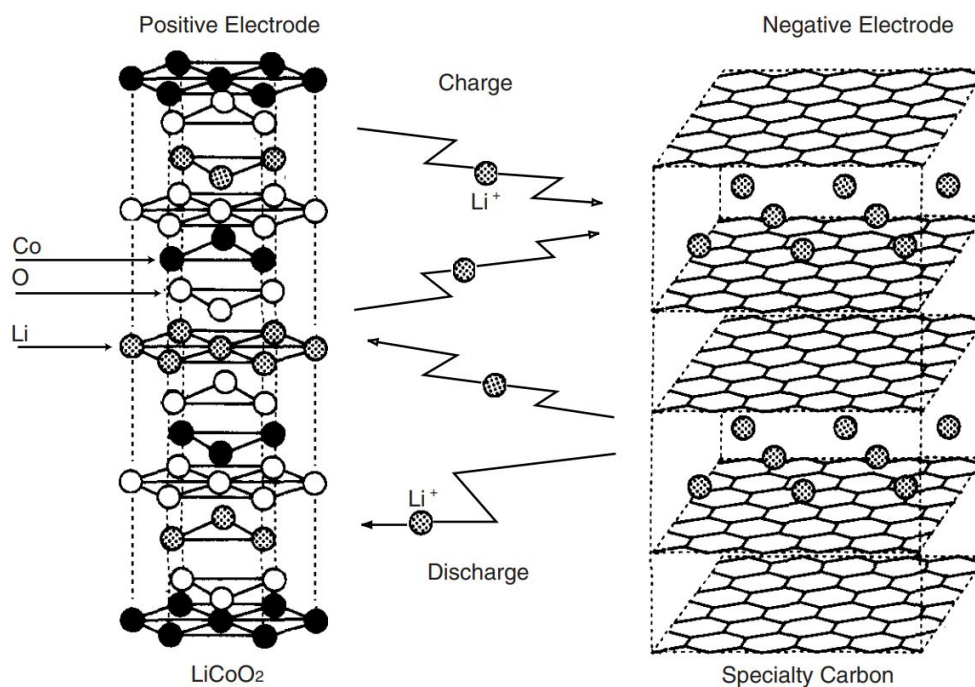
V dnešní době se lze nejčastěji setkat s lithiovými články označené jako: Lithium-iontové, Lithium-polymerové, Lithium-železo-fosfátové, Lithium-titanové. Toto rozdělení není zcela přesné a lze se setkat se stejně označenými články s jinými vlastnostmi, proto je nezbytné vždy provozovat článek podle pokynů výrobce. [6]

1.5.1 Lithium-iontové články

Lithium-iontové články, označované také Li-ion, jsou nejběžnějším typem dobíjecí lithiové baterie. Li-ion články se používají v přenosných elektronických zařízeních, elektrických vozidlech a v bateriových úložištích energie, například ve fotovoltaických systémech. Články používají katodu z dioxidu lithno-kobaltitého (LiCoO_2) a grafitovou anodu. Elektrolyt má článek v kapalném formě. Popsané materiály jsou ty nejběžnější, lze narazit i na jiné. Li-ion články mají vysokou hustotu energie na kilogram 150 - 200 Wh/kg. Ve speciálních aplikacích lze dosáhnout až 240 Wh/kg. Hustota energie na litr objemu je také dosahuje vysokých hodnot, 250 - 293 Wh/L. Cyklická odolnost je 500 - 1000 cyklů, ale je silně závislá na způsobu používání. [30]

Li-ion články mohou být různého chemického složení. Níže popsaný vybíjecí a nabíjecí proces je pro nejběžnější články, kde je katoda tvořena z LiCoO_2 a anoda z grafitu. [9]

Během vybíjení se lithiové ionty pohybují od anody ke katodě skrze elektrolyt. Pohyb iontů je doprovázen uvolňováním elektronů z anody, které proudí elektrickým obvodem do katody. Energie je spotřebována v obvodu. Během nabíjení je proces obrácen, ionty proudí od katody k anodě za energie dodávané z vnějšího zdroje, která přesouvá elektrony vnějším okruhem z katody do anody. Graficky znázorněné chemické děje jsou na obr. 1.4. Chemická reakce nabíjení článku je: [9]



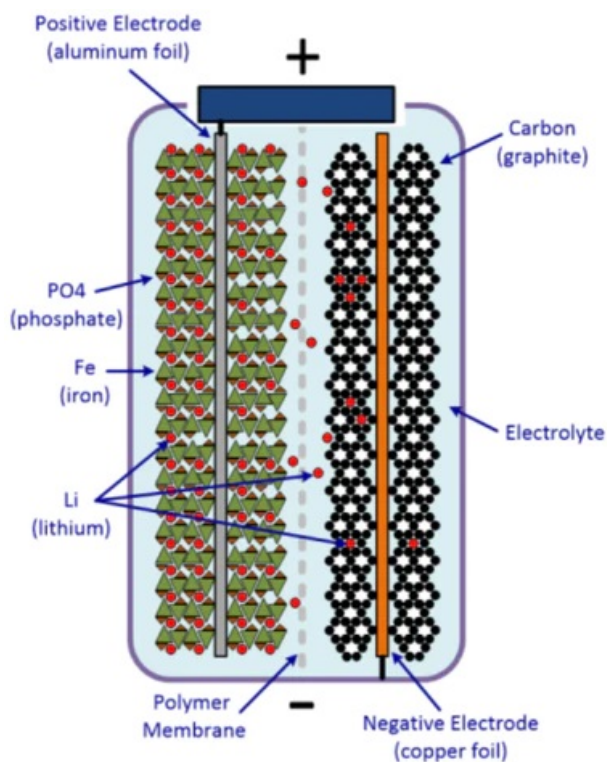
Obrázek 1.4: Chemické reakce v Li-ion článcích [18]

1.5.2 Lithium-polymerové články

Jedná se o odvozeninu z klasické li-ion technologie též označované jako LiPo nebo LiPol. Chemické děje jsou identické, ale v článku není elektrolyt v kapalné formě, ale ve formě pevného polymerního elektrolytu. Díky tomu jsou články lehčí a flexibilnější. LiPo články se dají vyrobit pro velmi velké proudy, až 120C, tedy sto dvacetinásobek kapacity. Také se považují za bezpečnější než klasické Li-ion. Nevýhodou je menší hustota energie. Životnost článků je menší než klasické Li-ion, přibližně 300 - 500 cyklů. Pro dobrou životnost je nutné články neustále cyklovat, při ponechání v nabitěm stavu ztrácí kapacitu. I při správném použití je obvykle deklarovaná životnost kolem 3 let. [20, 26]

1.5.3 Lithium-železo-fosfátové články

Lithium-železo-fosfátové články se také zkráceně označují LiFePO_4 . LiFePO_4 používají katodu s fosforečnanem lithno-železnatým namísto katody na bázi kobaltu. Díky jiné katodě jsou články bezpečnější, protože neobsahují nikl, ani kobalt. To také snižuje výrobní cenu článků. Jako elektrolyt se používají soli lithia rozpuštěné v organickém roztoku. Schématické znázornění baterie je na obr. 1.5. Články se vyznačují velmi dobrou životností. Za obvyklých podmínek kolem 3000 cyklů, za optimálních podmínek i více než 10 000 cyklů. Na rozdíl od Li-ion mají LiFePO_4 články nižší hustotu uložené energie, 90 - 160 Wh/kg a přibližně 325 Wh/L. [9, 38]



Obrázek 1.5: Schéma baterie LiFePO_4 [38]

1.5.4 Lithium-titanové články

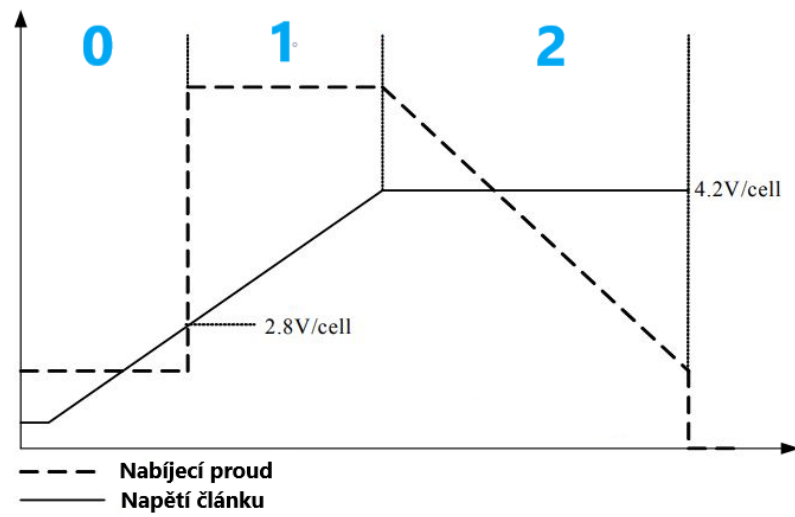
Lithium-titanové články ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) případně označované jako LTO jsou typem Li-ion článků. Články používají místo uhlíkové anody anodu z lithium-titanátu. Tento materiál umožňuje vytvoření nanokrystalů, které rapidně zvyšují povrch anody. Díky této úpravě je možné nabíjet a vybíjet trvale LTO články až deseti násobkem jejich kapacity. Teoreticky je tedy možné článek nabít za 6 minut. V reálných aplikacích se dosahuje nabití na 80 % za 6 minut. LTO články mají výbornou životnost více než 20 000 cyklů při hloubce vybití 100%. Je tedy možné odebrat veškerou energii z článku, aniž by to mělo vliv na životnost. Články také mohou pracovat při nízkých teplotách. Zatímco běžné Li-ion články mají dobré vlastnosti přibližně do 0°C , LTO jsou použitelné až do -30°C . Zároveň jsou LTO články považovány za velmi bezpečné s minimální rizikem požáru nebo výbuchu. [39, 24, 41]

Nevýhodou LTO článků je malá hustota uložené energie 45 - 100 Wh/kg a přibližně 85 - 202 Wh/L. S touto nevýhodou je spojené malé napětí jednoho článku. Nominální hodnota je 2,3 V. Hlavní překážkou rozšíření LTO článků je jejich vysoká cena, kdy je 1 kW/h LDO až třikrát dražší než LiFePO_4 . [13, 24, 41]

1.6 Nabíjení elektrochemických článků založených na lithiu

Metoda nabíjení lithiových elektrochemických článků je jednodušší než u olověných článků. Typickou nabíjecí charakteristiku je možné vidět na obr. 1.6. Jedná se o nabíjecí charakteristiku čipu NC3791 určeného pro nabíjení Li-ion článků. Skládá se pouze z charakteristiky nabíjení konstantním proudem (oblast 1) a po dosažení nominálního nabíjecího napětí pokračuje nabíjením konstantním napětím (oblast 2). Oblast 0 se standardně nevyužívá, je určena pro případ, že článek je vybitý pod úroveň běžného provozu. Z tohoto stavu je obvykle možné článek oživit. Nejlepší metoda oživování je nabíjet článek malým proudem a počkat, až jeho napětí stoupne na přijatelnou mez, v tomto případě na 2,8 V. Nabíjení je ukončeno, pokud nabíjecí proud klesne na hodnotu blízkou nule při režimu konstantního napětí 4,2 V. [2]

Samotné nabíjení je oproti olovu jednodušší, ale jsou kladeny velké nároky na přesnost nabíjení konstantním napětím, kde nesmí napětí překročit povolenou hodnotu. Obvyklá přesnost napětí je kolem 1 %. [2]



Obrázek 1.6: Nabíjecí charakteristika čipu NC3791 určeného pro Li-ion baterie[2]

Kapitola 2

Problematika řazení článků do baterie a ochrana článků

Baterie se skládá z jednoho a více elektrochemických článků. Umístění těchto článků v baterii je rozhodující pro celkové parametry baterie. Uspořádání článků se může lišit v závislosti na použití baterie. Sériová uspořádání zvyšují výstupní napětí baterie, zatímco paralelní uspořádání zvyšují výstupní proud. V některých případech může být pro dosažení požadovaného napěťového a proudového výstupu použita kombinace sériového a paralelního uspořádání.

2.1 Zapojení baterie s jednou buňkou

Baterie s jednou buňkou je nejjednodušší zapojení baterie, které obsahuje pouze jeden elektrochemický článek. Obvykle se s touto konfigurací setkáváme u malých přenosných zařízení, které mají relativně nízkou spotřebu energie, nebo se klade důraz na jejich jednoduchost. Typicky se může jednat o hodiny, budíky, svítilny, ale i mobilní telefony, nebo tablety. Příklad této konfigurace je na obr. 2.1. Toto zapojení se obvykle označuje jako 1S.



Obrázek 2.1: Zapojení baterie s jedním článkem (1S) [17]

Velkou výhodou této konfigurace je její jednoduchost, napětí na výstupu celé baterie je i napětí na jednom článku, není tedy nutné instalovat další bezpečnostní elektroniku do baterie. Stačí pouze hlídat výstupní napětí.

2.2 Baterie spojená ze sériově řazených článků

Sériové zapojení článků se využívá v situacích, kde napětí jednoho článku není dostatečné. Sériového zapojení je dosaženo připojením kladného pólu článku k zápornému pól dalšího článku. Příklad zapojené je na obr. 2.2. Na obrázku jsou sériově zapojené čtyři Li-ion články, s celkovým nominálním napětím 14,4 V. Toto zapojení se také obvykle označuje 4S.



Obrázek 2.2: Baterie složená z 4 článků zapojených do série (4S)[17]

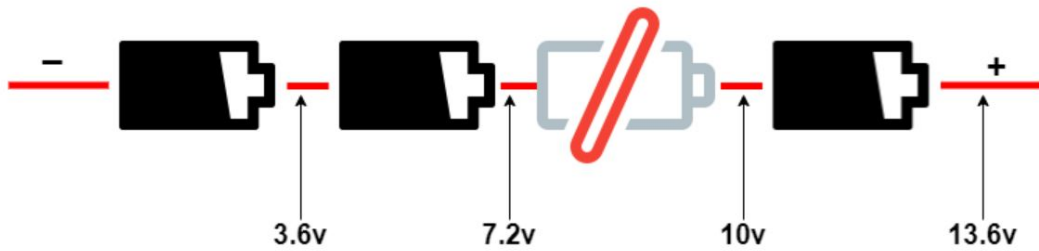
Počet článků v baterii je závislý na požadovaném napětí. Olověná baterie se skládá z článku o nominálním napětí 2 V. Běžná olověná baterie používaná v automobilovém průmyslu má 12 V, skládá se tedy z šesti článků. Je patrné, že není možné složit libovolné napětí, vždy pouze násobky napětí článků. Pokud je nutné napětí, které není možné dosáhnout prostým skládáním článků, obvykle se zvolí nejbližší hodnota, a zařízení je doplněno DC/DC měničem.

Častým problémem sériového zapojení baterie je nestejnorodost jednotlivých článků. To se projevuje zejména u lithiových článků. U olověných článků se tento problém zpravidla v baterii neřeší, protože baterie obvykle stárne jako celek rovnoměrně a jednotlivé články jsou tolerantnější k přebití a podbití oproti článkům založených na lithiu. Ovšem i u olova je nutné tento problém řešit, pokud spojujeme různé baterie do větších celků.

Nejčastější problém je různá kapacita jednotlivých článků. Příklad takové situace je na obr. 2.3. Na obrázku jsou 4 články zapojené do baterie. Přeškrtnutý článek má výrazně větší kapacitu než zbylé tři a nabíjí se výrazně pomaleji. Zatímco ostatní články jsou rovnoměrně nabité, jejich napětí je 3,6 V, článek s vyšší kapacitou má pouze 2,8 V. V případě, že sledujeme pouze celkové nabití baterie, jeví se jako nenabitá, protože ještě nedosáhla plně nabitého napětí a proces nabíjení bude pokračovat. Při pokračujícím nabíjení dojde k přebití článků s nižší kapacitou a následně zvýšené degradaci celé baterie. Může dojít i k požáru, nebo v krajních případech k explozi. Tato situace může nastat i v případě poruchy článku.

Obdobná situace může nastat i při vybíjení, kde napětí na článku s nižší kapacitou klesne pod doporučenou úroveň. Z praktických zkušeností víme, že článek, kterému kleslo napětí pod doporučenou hodnotu, je možné oživit dobíjením velmi malým proudem po dlouhou dobu, ale typicky ztratí výraznou část své kapacity.

Někteří výrobci nabízejí baterie složené z výroby z naprosto stejných článků, čímž se snaží eliminovat problém různé kapacity. Tyto baterie neobsahují elektroniku a spoléhá se pouze na správné složení ve výrobě. [42]

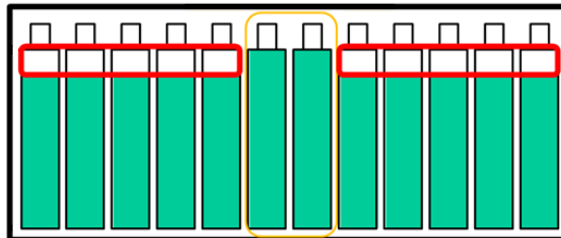


Obrázek 2.3: Zapojení 4S s článkem větší kapacity [17]

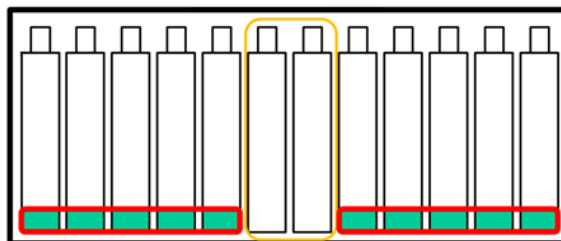
2.3 Vyvažování článků baterie

K vyřešení problému různých kapacit jednotlivých článků se používá takzvané vyvažování článků. Existuje několik metod realizace, nejčastěji se rozdělují na pasivní a aktivní. V obou případech je na každý článek baterie přidána elektronika, která hlídá napětí na článku a v případě dosažení povolené hranice elektronika zareaguje.

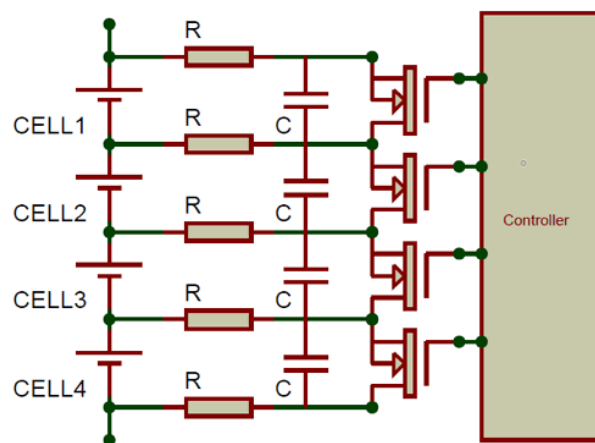
Pasivní vyvažování článků je obvykle aktivní pouze při nabíjení, kde hlídá napětí na článku a pokud napětí na článku dosáhne maximální povolené hodnoty, přemění další nabíjecí energii na teplo (viz obr. 2.4). Na obrázku jsou dva články již plně nabité, nabíjení pokračuje, ale energie pro nabité články je přeměněna na teplo. Tato metoda je relativně levná a jednoduchá na implementaci. Příklad obvodu pasivního balancování je na obr. 2.6. Zapojení z principu snižuje účinnost celé baterie. Baterie má kapacitu nejslabšího článku, protože baterie je odpojena, pokud se vyčerpají nejslabší články, a proto energie uložená v ostatních není využita (viz obr. 2.5).



Obrázek 2.4: Baterie s nevyváženými články (dva články jsou již plně nabité) [37]



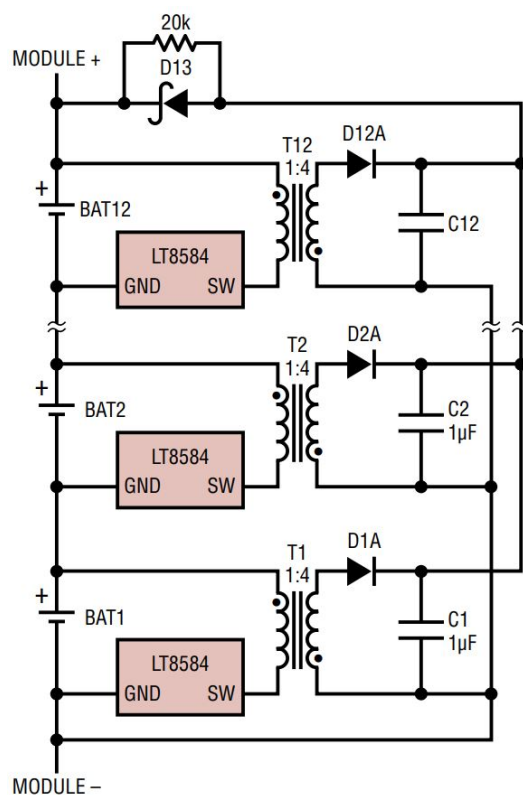
Obrázek 2.5: Baterie s nevyváženými články (dva články jsou již plně vybité)[37]



Obrázek 2.6: Příklad obvodu pasivního balanceru [33]

Aktivní vyvažování přerozděluje energii ze silnějších článků na články slabší. Tento princip funguje jak u nabíjení, tak při vybíjení. Výsledkem je vždy plně využitá kapacita baterie. V případě uvedeném na obr. 2.4, by přebytečná energie z nabitých článků byla využita pro nabití ostatních článků. V druhém případě by energie z ne úplně vybitých článků byla využita k doplnění energie ve vybitých článcích.

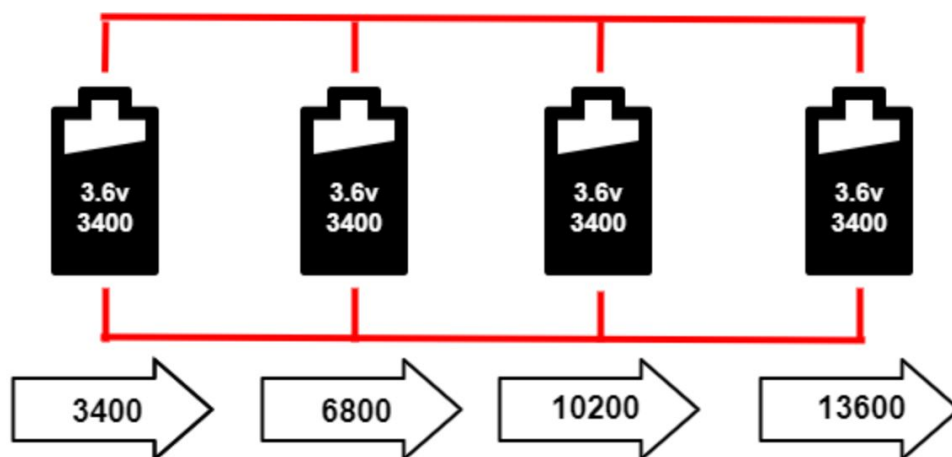
Příklad obvodu aktivního balancování je na obr. 2.7. Je patrné, že implementace je výrazně složitější a dražší než u pasivního balancování, nicméně se stále více využívá z důvodu lepšího využití energie uložené v baterii.



Obrázek 2.7: Příklad obvodu aktivního balanceru [27]

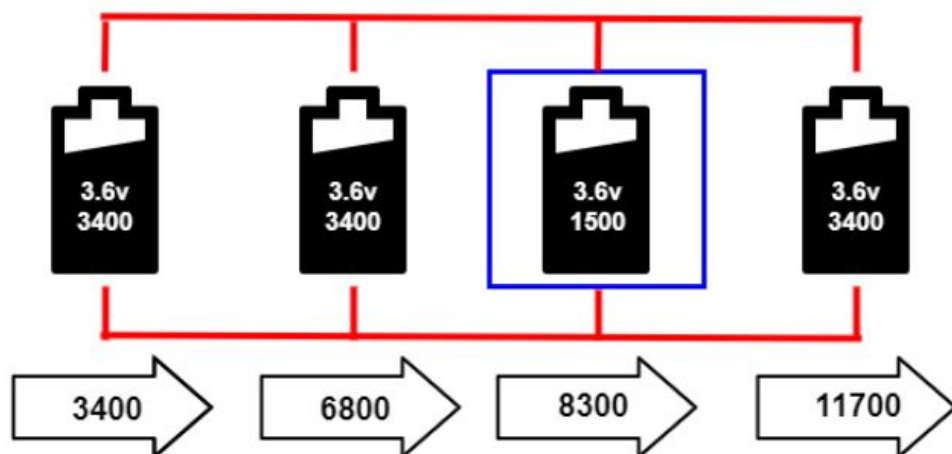
2.4 Baterie zapojená z paralelně řazených článků

V případě, že maximální povolený proud z jedné baterie není dostatečný pro provoz zařízení, je možné zapojit články paralelně. Tímto zapojením se také zvyšuje kapacita. Výsledná kapacita je při paralelní kombinaci článků je dána součtem kapacit jednotlivých článků. Příklad paralelní kombinace je na obr. 2.8, označuje se 4P. Napětí kombinace je v případě li-ion článků 3,6 V. Celková kapacita baterie je 13 600 mAh.



Obrázek 2.8: Baterie složená z 4 článků zapojených paralelně (4P) [17]

Rozdíl jednotlivých článků je při paralelní kombinaci méně kritický než při sériové kombinaci. Pokud je jeden článek v horším stavu, má sníženou kapacitu, celková kapacita se zmenší, ale nehrozí destrukce článků. Viz obr. 2.9.



Obrázek 2.9: Zapojení 4P s článkem menší kapacity [17]

Ke kritické situaci může dojít, pokud je článek poškozen tak, že se jeví jako zkrat. V tomto případě ostatní články budou dodávat proud do zkratovaného článku až do

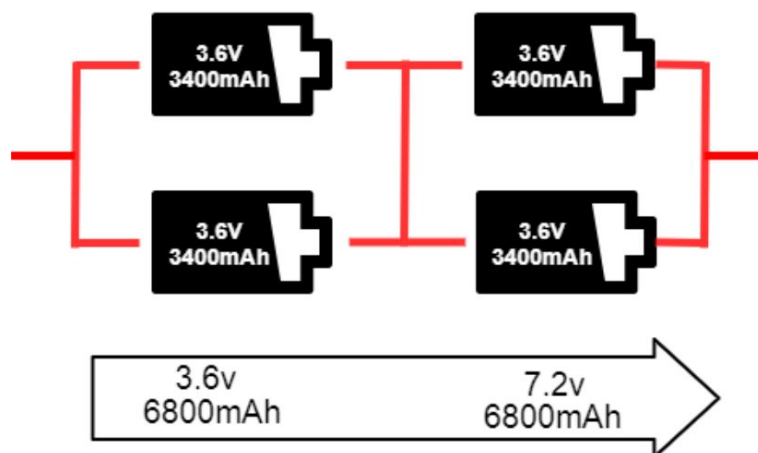
úplné ztráty napětí. Prevence těchto situací se obvykle řeší zapojením článku přes pojistku. Dobrým příkladem je bateriový modul z automobilu TESLA na obr. 2.10, kde je článek připojen tenkým drátem sloužícím zároveň jako proudová pojistka.



Obrázek 2.10: Připojení článků sloužící i jako pojistky v baterii z automobilu TESLA [36]

2.5 Sérioparalelní kombinace

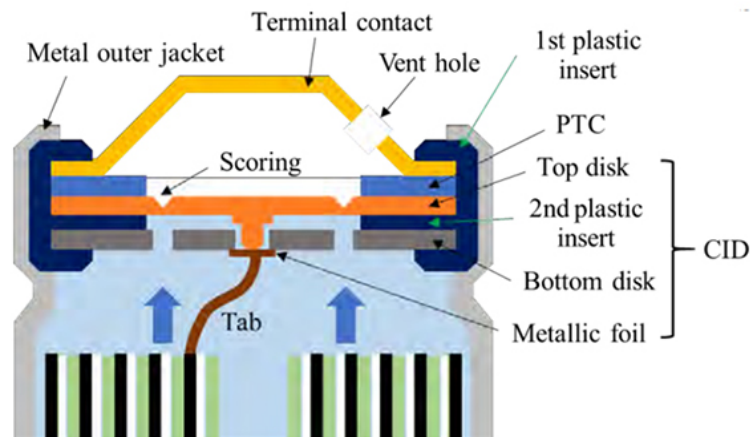
Jedná se o velmi častou kombinaci u větších baterií. Baterie poskytuje požadované napětí i kapacitu. Příklad je na obr. 2.11. Baterie na obrázku má dva paralelně zapojené články 3,6 V a 3400 mAh. Výsledkem kombinace je 3,6 V a 6800 mAh. Dva tyto bloky jsou zapojené do série. Výsledná baterie je tedy 7,2 V a 6800 mAh. Tato konfigurace se označuje 2S4P.



Obrázek 2.11: Sérioparalelní kombinace 4SP2 [17]

2.6 Vestavěné ochrany baterií

Někteří výrobci baterií dodávají své články s ochranou integrovanou přímo do článku. Muže se jednat například o ochranu CID (current interrupt device). Tento typ pojistky hlídá stav článku, a pokud překročí povolené meze, trvale odpojí článek od obvodu. Dalším typem ochrany je například TPC rezistor. Jedná se o součástku, která má velmi nízký odpor při běžné provozní teplotě, ale pokud teplota stoupne nad přijatelnou hranici, odpor velmi rychle stoupá. Tato ochrana je vratná, po vychladnutí se odpor TPC vrátí na původní hodnotu. Příklad takovýchto ochran je na obr. 2.12. Na obrázku je Li-ion článek. Na vrchu je první bezpečnostní prvek, přetlakový ventil. Pod ventilem je modrá vrstva představující PTC ochranu a následují čtyři vrstvy společně tvořící CID ochranu. [10]



Obrázek 2.12: Příklad CID a TPC ochrany [10]

Kapitola 3

Návrh zařízení

Zařízení by mělo být schopno změřit a simulovat baterii. Činnost zařízení lze tedy rozdělit do 3 kategorií. V první kategorii případů je zařízení použito k testování baterie. Tedy vybíjet baterii požadovaným způsobem, typicky konstantním proudem a měřit napětí, proud a odebranou energii. Druhým případem použití je simulace. Tento případ se dále dělí na dva režimy - režim vybíjení baterie a režim nabíjení. Při vybíjení se zařízení chová jako zdroj a klesá mu napětí na výstupu v závislosti na odebrané energii. Při nabíjení se zvyšuje napětí v závislosti na dodané energii. Mezi těmito režimy musí být zařízení schopno libovolně přecházet.

Navrhované zařízení se skládá ze čtyř základních prvků:

- Zdroj
- Elektronická zátěž
- Řídící obvody
- Pomocné obvody

3.1 Zdroj

Zařízení je určeno k aktivní spolupráci s bateriemi, a proto musí obsahovat vlastní zdroj energie. Topologie zdroje má významný vliv na složitost zařízení i na jeho funkční parametry.

První možnost je realizace pomocí transformátoru a lineárního regulátoru (blokový diagram je na obr. 3.1). Transformátor sníží síťové napětí na hodnotu mírně vyšší než je maximální požadovaná. Usměrňovač napětí usměrní a filtr vyhladí. Regulátor poté reguluje napětí na výstupních svorkách. Výkonové prvky v regulátoru pracují v lineárním režimu. Lineární režim produkuje mnoho ztrát energie, která se mění v teplo. V konkrétním případě může jeho velikost dosáhnout $P_{ZTRAT} = 240 \text{ W}$. Ztrátový výkon této velikosti klade velké nároky na chlazení. Jestliže nebude možné ztrátový výkon odvést z polovodiče, dojde k jeho destrukci vlivem přehřátí. Tento

problém je možné částečně vyřešit rozložením výkonu do několika paralelně zapojených výkonových prvků. Výkonovou ztrátu je možné snížit použitím transformátoru s odbočkami ze sekundárního vinutí a vhodným způsobem přepínat vstupní napětí do regulátoru. Vhodné transformátory nejsou standardně k dostání a jejich zakázková výroba je neúnosně drahá. Tato varianta také nabývá na složitosti z důvodu nutnosti chytrého přepínání odboček transformátoru.



Obrázek 3.1: Blokové schéma topologie s transformátorem a lineárním regulátorem

$$P_{ZTRAT} = (U_{IN} - U_{OUT}) \times I_{OUT} = 24 \times 10 = 240W \quad (3.1)$$

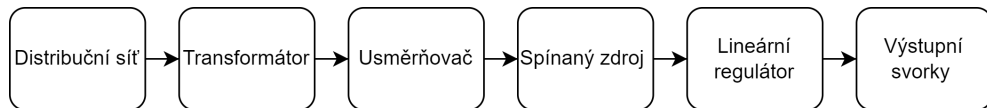
Druhá varianta realizace je využití spínaného zdroje. Schéma topologie je na obr. 3.2. Ve schématu je zakreslen i síťový transformátor. Principiálně není v této topologii nutný, bylo by však nutné zařízení certifikovat k provozu na distribuční síti. Pro realizaci je tedy vhodné využít již certifikovaný transformátor. V této topologii pracují výkonové prvky ve spínacím režimu. Tranzistor je tedy vždy úplně otevřen, nebo úplně zavřen. Ke ztrátám dochází při změně z vodivého stavu na nevodivý a obráceně. Další ztráty vznikají při vodivém stavu, který není 100% vodivý. Tyto ztráty jsou zpravidla výrazně menší než při použití lineárního regulátoru. Spínané zdroje pracují na frekvencích výrazně vyšších než je síťových 50 Hz. Vysoké provozní frekvence umožňují použít vysokofrekvenční transformátory, respektive indukčnosti, které vycházejí menší a lehčí než na síťovou frekvenci 50 Hz. Použití spínaného zdroje s účinností $\eta = 0,8\%$ ve stejném případě jako lineární regulátor je ztrátový výkon $P_{ZTRATS} = 2,5 W$ (3.2). Tento modelový příklad není zcela vypovídající. V některých případech nevhodného zatížení obvykle méně než 10% nebo více než 90% mohou spínané zdroje mít i horší účinnost než lineární regulátor. Další nevýhodou spínaných zdrojů je jejich výstupní vysokofrekvenční rušení a menší stabilita výstupního napětí. Z důvodu potlačení vysokofrekvenčního rušení je nezbytné použití vhodných filtrů na vstupu a výstupu spínaného zdroje.



Obrázek 3.2: Blokové schéma topologie se spínaným regulátorem

$$P_{ZTRATS} = \frac{U_{OUT} \times I_{OUT}}{\eta} - U_{OUT} \times I_{OUT} = \frac{1 \times 10}{0,8} - 1 \times 10 = 2,5 W \quad (3.2)$$

Jako další varianta je kombinace obou výše popsaných topologií. Vhodnou kombinací lze výrazně omezit nevhodné vlastnosti obou variant. Blokové schéma kombinace topologií je na obr. 3.3. V tomto případě spínaný zdroj s dobrou účinností sníží napětí na vstupu regulátoru. Lineární regulátor odfiltruje výstupní zvlnění spínaného zdroje a díky malému rozdílu vstupního a výstupního napětí je výkonová ztráta relativně malá. Toto uspořádání může mít nejlepší vlastnosti za podmínky, že lineární regulátor je schopen rychle reagovat na změnu zátěže. Spínaný regulátor vždy zachová dostatečný rozdíl napětí na vstupu lineárního regulátoru oproti požadovanému výstupnímu napětí. Hlavní problém této topologie je vhodné nastavení regulačních smyček, aby nedocházelo ke kmitavým stavům. Regulační smyčku lze řešit analogově, nebo digitálně pomocí mikroprocesoru (μP).



Obrázek 3.3: Blokové schéma kombinace topologie spínaného zdroje a lineárního regulátoru

3.2 Elektronická zátěž

Zátěž je elektronický obvod, který spotřebovává energii v závislosti na nastavených parametrech. V přístroji bude využívána ve dvou režimech, režim konstantního proudu a režim konstantního napětí.

Režim konstantního proudu je určen k měření vybíjecí charakteristiky baterie. Z baterie je odebírán konstantní proud a měří se napětí na baterii - zátěž je v režimu konstantního proudu (CC). Z Ohmova zákona (3.3) vyplývá, že pro zachování konstantního proudu při měnícím se napětí baterie je nutné měnit zatěžovací odpor. Zde by bylo vhodné využít režim odebírání konstantního výkonu, který lépe simuluje použití testované baterie v přístroji. Tento režim je však velmi náročný na analogovou realizaci, přesněji součin napětí a proudu (3.4). Za předpokladu pomalé změny napětí je možné využít režim konstantního proudu a upravovat odebíraný proud pomocí μP .

Druhý režim musí simulovat baterie. Odebírat energii dodanou z externího zdroje a mírně zvyšovat napětí, jako simulaci nabíjení baterie. V druhém případě musí dodávat energii a mírně snižovat napětí, tedy simulovat vybíjení baterie. Jedná se o zátěž na konstantní napětí (CV). Změna napětí při nabíjení je regulovaná nastavením zátěže z μP .

$$I = \frac{U}{R}; U = I \times R \quad (3.3)$$

$$P = U \times I \quad (3.4)$$

3.2.1 Využití energie

Ze zákona zachování energie vyplývá, že pokud chceme energii odebrat z jednoho zdroje, musíme ji někam předat. Obvykle využívaná metoda je přeměnit přebytečnou energii na teplo. Tento způsob je jednoduchý a snadno realizovatelný. Odvedená energie je vyzářena do okolí ve formě tepla. To sebou nese požadavek na dostatečně výkonné chlazení. Tato energie již standardně není využívána.

Druhá možnost je odvést energii jinam. Tato možnost je výrazně šetrnější ke spotřebě energie, lze ji například využít k nabíjení jiné baterie. Toto řešení se dnes již používá jako BMS pro baterie, kde články baterie s menší kapacitou je průběžně dobíjen článkem baterie s vyšší kapacitou. Tyto systémy jsou komplikované a vyžadují obvykle galvanicky oddělené měniče. V případě, že energie není spotřebovaná externím spotřebičem, je stejně nutné ji přeměnit v teplo.

3.3 Řídící obvody

Zařízení bude ovládáno digitálně pomocí μP . Požadavky na výkon nejsou kritické, ale je vhodné aby měl dostatek správných periférií a tím eliminoval nutnost použití externích převodníků. Periferie použité pro komunikaci s analogovou částí, tedy A/D a D/A převodníky. Další vhodná periferie je pro komunikaci s PC, tedy USB nebo Ethernet.

3.4 Pomocné obvody

Pomocné obvody jsou zejména zdroje vhodného napětí pro jednotlivé prvky a napěťové reference. Jiné pomocné obvody nejsou nutné.

Kapitola 4

Realizace

4.1 Stanovení parametrů zařízení

Před začátkem konkrétního návrhu je nutné přesně stanovit parametry zařízení. Ze zadání jsou dané tyto parametry:

- Provozní napětí 1 V až 21 V
- Maximální proud 10 A
- Obsluha zařízení je možná lokálně z panelu nebo z PC

4.2 Realizace

4.2.1 Před-regulátor

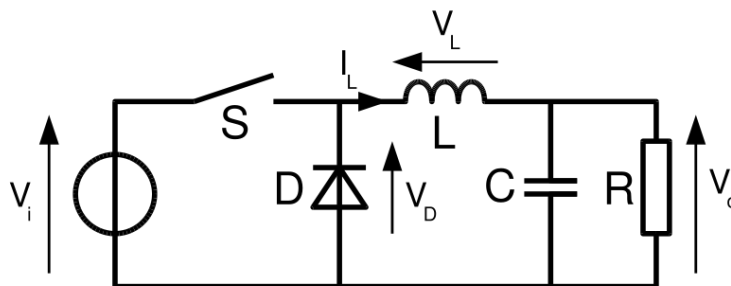
Požadavky na před-regulátor jsou relativně specifické zejména výstupním proudem $I_{OUT} = 10$ A. Pro realizaci jsem navrhl před-regulátor založený na čipu SiC461 využívající topologii Synchronní Buck. Čip je možné napájet v rozmezí 4,5 - 60 V. Pracovní proud je 10 A. To se může zdát jako poddimenzování, nicméně je čip schopen dodávat požadovaný proud trvale, typicky dokáže dodat až 13 A. [1]

Synchronní Buck

Jedná se o topologii DC/DC spínaného zdroje, které se také říká step-down. Tato topologie je schopná snižovat vstupní napětí a zároveň zvyšovat proud. Řadí se mezi DC/DC měniče, které nejsou galvanicky oddělené. Účinnost těchto měničů často dosahuje více než 90%. V případě použití čipu SiC461 může dosáhnout až 98%.

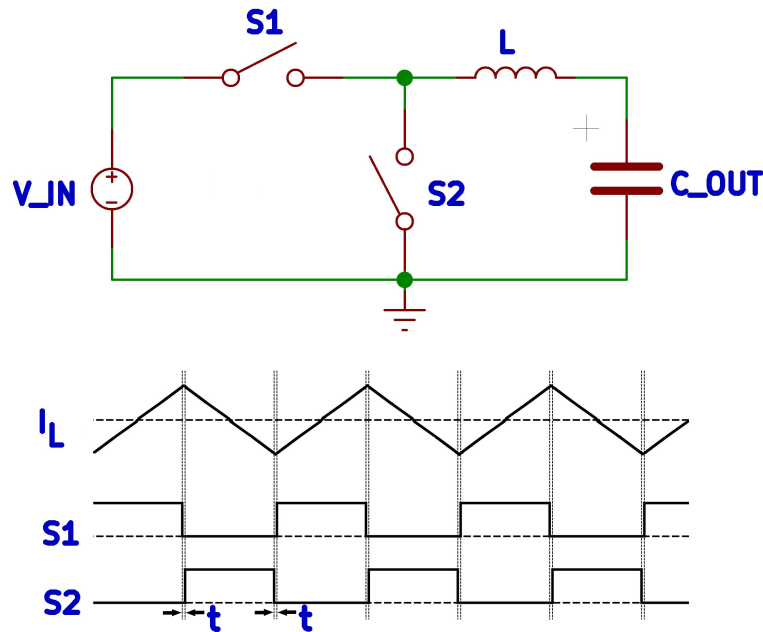
Základní schéma je vyobrazeno na obr. 4.1. Princip funkce spočívá v sepnutí spínače S. Indukčností L začne protékat zvyšující se proud, v reakci na protékající

proud se na indukčnosti vytvoří napětí opačné polarity, než je zdrojové. Výsledné napětí na zátěži je rovno algebraickému součtu napětí na zdroji a napětí na indukčnosti. Protože napětí na indukčnosti je opačné polarity než napětí na zdroji, výsledné napětí je vždy menší než zdrojové. Rychlost změny proudu postupně klesá, čímž klesá i napětí na indukčnosti a zvyšuje se napětí na zátěži. Během tohoto procesu indukčnost ukládá energii ve formě magnetického pole. Pokud napětí na zátěži dosáhne maximální povolené hodnoty, spínač S se rozezne a odpojí zdroj. Začne se snižovat procházející proud a v důsledku toho se na cívce vytvoří napětí stejné polarity, jako bylo napětí zdroje a indukčnost se chová jako zdroj proudu, využívající energii uloženou ve formě magnetického pole. Obvod je v tomto stavu uzavřen přes diodu D. Při poklesu proudu do zátěže, respektive poklesu napětí na zátěži, se sepne spínač S a energie je opět dodávána ze zdroje. Kondenzátor C slouží jako vyhlazovací. [12]



Obrázek 4.1: Základní schéma buck měniče [12]

Pro zvýšení efektivity je možné nahradit diodu D druhým tranzistorem. Toto uspořádání se nazývá synchronní buck. Schéma synchronní buck s průběhy spínání S1, S2 a průběhem proudu cívkou je na obr. 4.2. V tomto případě je nutné vhodně nastavit časování, aby nedocházelo k sepnutí S1 a S2 ve stejnou dobu. Integrované řídicí obvody obvykle vkládají mezi sepnutí S1 a S2 časovou mezeru (t) ve které není sepnut ani jeden spínač.



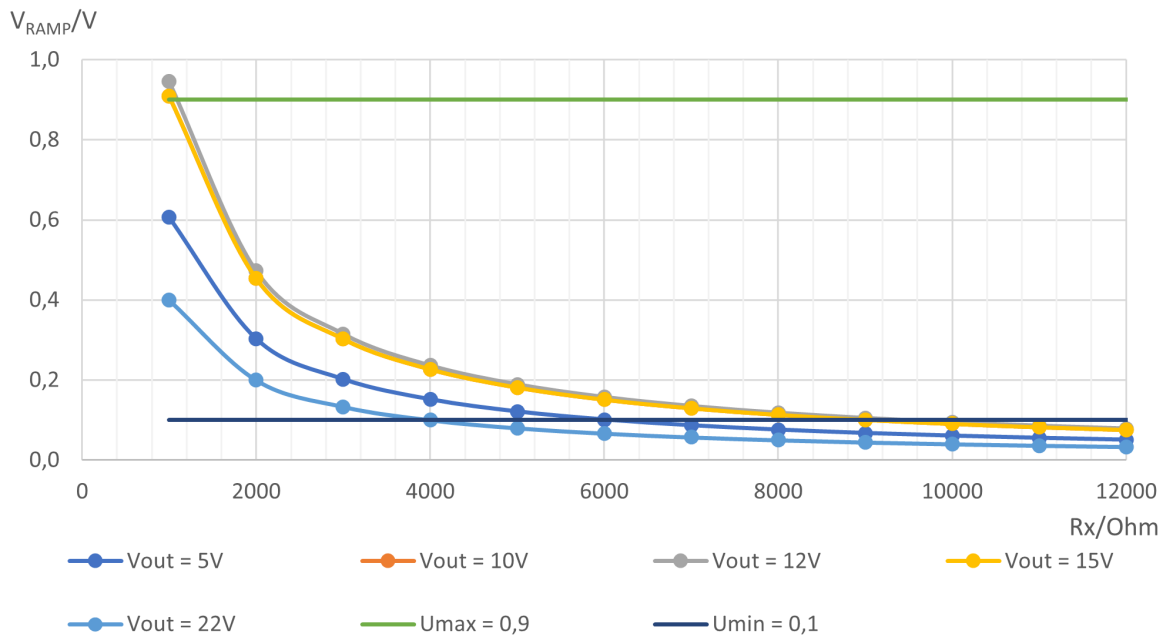
Obrázek 4.2: Schéma synchronní buck s průběhy spínání S1, S2 a průběhem proudu cívku

Návrh před-regulátoru

Samotný čip SiC461 obsahuje většinu potřebných komponent. V zásadě je nutné dodat jen cívku, kompenzační zpětnou vazbu a nastavení konfigurace. SiC461 umožňuje pro vyšší efektivitu takzvaný Power-Save mod. Režim je určen pro situaci nízkého zatížení zdroje, kdy pro snížení ztrát upravuje systém vyhodnocení zpětné vazby a snižuje frekvenci spínání pro omezení výkonové státy při spínání. Zde je i možnost zamknout nejnižší možnou frekvenci spínání 20 kHz, aby nedocházelo ke slyšitelnému pískání. Vzhledem k tomu že se bude jednat o zařízení připojené k elektrické síti, není Power-Save mod aktivován. SiC461 má možnost pro napájení vnitřní logiky využít vnitřní lineární regulátor, nebo zapojit externí zdroj napětí. Tato možnost je reprezentovaná jako varianta pro snížení ztrátového výkonu na čipu. Maximální proud vnitřního regulátoru je 30 mA při 5 V. Pro předpokládané napájecí napětí 25 V je tedy ztrátový výkon 0,6 W. I přes tento nárůst ztrátového výkonu jsem se rozhodl využít vnitřní regulátor a eliminovat nutnost další externí součástky. Spínané zdroje mají na výstupu často velké kapacity pro vyhlazování výstupního napětí. Tento fakt způsobuje obtíže při zapínání, kdy se vybité kapacity chovají jako zkrat. Aby se zabránilo neúnosně vysokým nabíjecím proudům, má čip SiC461 možnost takzvaného Soft-Start. Při tomto režimu se výstupní napětí zvyšuje postupně. Plného výstupního napětí je dosaženo až po nastavené době. Dobu náběhu jsem zvolil doporučenou pro použitou výstupní kapacitu $t_{ss} = 5,28 \text{ mS}$ (4.1).

$$t_{ss} = \frac{C_{ss} \times 0,8}{5 \times 10^{-6}} = \frac{33 \times 10^{-9} \times 0,8}{5 \times 10^{-6}} = 5,28 \text{ mS} \quad (4.1)$$

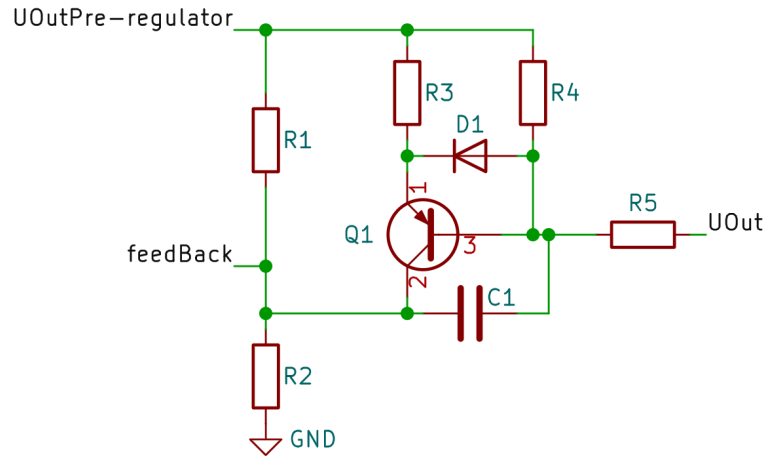
Závažnější problém nastává při volbě kompenzační zpětné vazby. Ta je určena pro kompenzaci výstupního zvlnění. Jako většina spínaných zdrojů je předpoklad změny vstupního napětí, ale pevné výstupní napětí. V tomto případě je však nutné měnit výstupní napětí podle potřeby. Nelze tedy využít standardní výpočet kompenzace. Kompenzace je určena k minimalizaci výstupního zvlnění V_{ramp} . Empiricky jsem zvolil nejvhodnější hodnoty $C_X = 22 \text{ nF}$ a $C_Y = 3,9 \text{ nF}$. Hodnotu $R_X = 3 \text{ k}\Omega$ jsem určil z grafu na obr. 4.3. V grafu jsou vyneseny závislosti výstupního zvlnění na volbě odporu R_X . Hodnoty U_{max} a U_{min} jsou maximální a minimální hodnoty zvlnění pro které platí rovnice z datasheetu k SiC461. Z grafu je patrné, že výstupní zvlnění může dosahovat i poměrně vysokých hodnot. Je třeba tedy volit vhodné výstupní napětí před-regulátoru, aby bylo možné zvlnění vykompenzovat regulátorem.



Obrázek 4.3: Závislost výstupního zvlnění V_{RAMP} , při různých výstupních napětích, na odporu R_X při hodnotách $C_X = 22 \text{ nF}$ a $C_Y = 3,9 \text{ nF}$

Jak bylo popsáno výše, nastavování výstupního napětí před-regulátoru je odvozeno z výstupního napětí zařízení. Standardně se výstupní napětí čipu SiC461 reguluje zpětnou vazbou z napěťového děliče na výstupním napětí. V tomto případě však je nutné výstupní napětí měnit v závislosti na jiném napětí. Pokud stoupne napětí na výstupu zařízení, musí stoupnout i napětí před-regulátoru. Použitý obvod je na obr. 4.4. V obvodu $R1$ a $R2$ tvoří standardní dělič výstupního napětí. $U_{outPre-regulator}$ je výstup napětí z před-regulátoru a $feedback$ je vstup zpětné napěťové vazby do SiC461. Rezistory $R1$ a $R2$ udávají maximální možné napětí, pokud je zpětná vazba neaktivní. Maximální napětí je $U_{P_{MAX}}$ je dáno vztahem 4.2, kde $R1$, $R2$ jsou odpory na obr. 4.4 a $U_{FB} = 0,8 \text{ V}$ je hodnota vnitřní reference. Z této hodnoty lze určit minimální napájecí napětí zařízení. Obvod SiC461 je schopen dosáhnout na výstupu 92% vstupního napětí. Minimální vstupní napětí je tedy přibližně $U_{P_{MAX}} = 27 \text{ V}$ (4.3). Ze schématu lze určit také minimální výstupní napětí.

Z obr. 4.4 je patrné, že při plně sepnutém tranzistoru je k hodnotě $R1$ paralelně připojen rezistor $R3$. Výsledné výstupní napětí je tedy $U_{P_{MIN}} = 0,99 \text{ V}$ (4.4). Takto nízkého napětí by však před-regulátor neměl nikdy dosáhnout. Na schématu jsou další součástky určeny pro správnou funkci a ochranu obvodu. Za zmínku stojí kondenzátor $C1$. Vhodná velikost kondenzátoru je nezbytná pro stabilní chod obvodu. [14]



Obrázek 4.4: Ovládání výstupního napětí před-regulátoru

$$U_{P_{MAX}} = \frac{R1 \times U_{FB}}{R2} + U_{FB} = \frac{301000 \times 0,8}{10000} + 0,8 = 24,88 \text{ V} \quad (4.2)$$

$$U_{NAP_{MIN}} = \frac{U_{P_{MAX}}}{0,92} = \frac{24,88}{0,92} = 27,04 \text{ V} \quad (4.3)$$

$$U_{P_{MIN}} = \frac{R1 || R3 \times U_{FB}}{R2} + U_{FB} = \frac{\frac{301000 \times 2400}{301000 + 2400} \times 0,8}{10000} + 0,8 = 0,99 \text{ V} \quad (4.4)$$

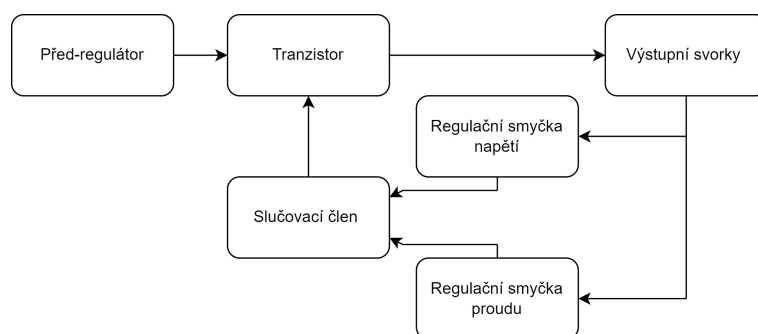
Při návrhu DPS jsem napodobil doporučené rozložení součástek a mědi, které se nachází v dataheetu k SiC461. Při návrhu je nutné počítat s možností vyšších teplot DPS. To se projeví zejména při výběru kondenzátorů, kde je nutné použít kvalitní elektrolyt. Standardní označení keramických kondenzátorů je v tabulce 4.1. Je vyžadovaná minimálně třída 7 v maximální provozní teplotě.

Tabulka 4.1: Tabulka označení keramických kondenzátorů

Minimální provozní teplota	Maximální provozní teplota	Přesnost
X = -55 °C	4 = 65 °C	P = ± 10%
Y = -30 °C	5 = 85 °C	R = ± 15%
Z = 10 °C	6 = 105 °C	L = ± 15% (-40% nad 125 C)
	7 = 125 °C	S = ± 22%
	8 = 150 °C	T = +22/-33%
	9 = 200 °C	U = +22/-56%
		V = +22/-82%

4.2.2 Regulátor

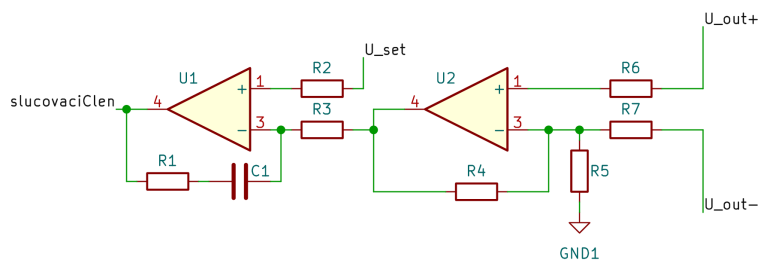
Regulátor je určen k nastavení, udržení a vyhlazení napětí. Nízké zvlnění výstupního napětí je zajištěno lineárním regulátorem. Vzhledem k tomu, že je vstupní napětí regulátoru sníženo před-regulátorem, je výkonová ztráta relativně malá. Blokové schéma je na obr. 4.5.



Obrázek 4.5: Blokové schéma regulátoru

Regulační smyčka napětí

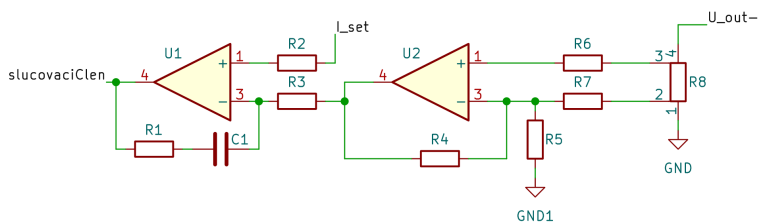
Zjednodušené schéma regulační smyčky napětí je na obr. 4.6. U_{out+} a U_{out-} jsou výstupní svorky zařízení. Operační zesilovač $U2$ funguje jako rozdílový zesilovač napětí na výstupních svorkách. Díky rezistorové síti složené z $R6$, $R7$, $R5$ a $R6$ převádí výstupní rozsah napětí 0–21 V na rozsah 0–2,5 V. Operační zesilovač $U2$ funguje jako rozdílový zesilovač mezi výstupním napětím a napětím nastaveným. U_{set} je vstup pro nastavení napětí, kde rozsah 0–2,5 V odpovídá výstupnímu napětí 0–21 V. RC článek $R1$ a $C1$ je určen ke případné stabilizaci regulační smyčky. V realizaci jsou přidány další součástky pro ochranu obvodu a případnou stabilizaci regulační smyčky.



Obrázek 4.6: Zjednodušené schéma napěťové regulační smyčky

Regulační smyčka proudu

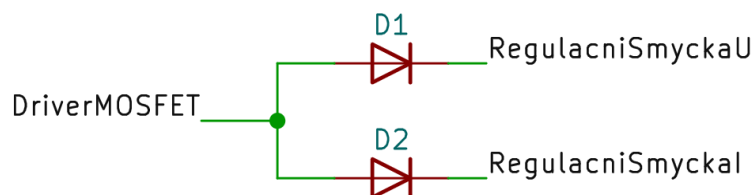
Regulační smyčka je pro omezení maximálního procházejícího proudu. Toto omezení je určeno pro eliminaci rizik poškození samotného zařízení i připojeného zařízení, nadměrným proudem. Zjednodušené schéma je na obr. 4.7. Regulační smyčka je velmi podobná regulační smyčce napěťové. Rozdíl je v operačním zesilovači $U2$, ten měří úbytek napětí na rezistoru $R8$ způsobený vlivem procházejícího proudu. Na rozdíl od napěťové smyčky zde $U2$ zesiluje napětí z $0-0,2V$ na rozsah $0-2,5V$. Operační zesilovač $U1$ porovná napětí z výstupu $U2$ a upraví své výstupní napětí. V realizaci jsou přidány další součástky pro ochranu obvodu a případnou stabilizaci regulační smyčky.



Obrázek 4.7: Zjednodušené schéma proudové regulační smyčky

Slučovací člen

Slučovací člen slouží k nastavení priorit regulačních smyček. Z obou smyček má přednost ta, která aktuálně výrazněji omezuje výstup. Druhá v tomto případě nesmí ovlivnit výstup. Díky vhodnému návrhu je možné tento člen realizovat jednoduše pomocí dvou diod. Viz obr. 4.8.



Obrázek 4.8: Schema slučovacího členu

4.2.3 Zátěž

Pro zjednodušení zapojení jsem se rozhodl rozdělit obvod realizující CC (konstantní proud) a CV (konstantní napětí). To samozřejmě vede ke zdvojení některých prvků, například výkonového tranzistoru. Tato nevýhoda je však vyvážena jednodušším zapojením a tedy jednodušším řešením případných kmitavých stavů.

Přebytečná energie bude v obou případech přeměněna na teplo. Nejedná se o vhodné využití přebytečné energie, nicméně případné úpravy pro využití energie se ukázaly jako velmi náročné na realizaci.

Zátěž realizující CC (Constant Current)

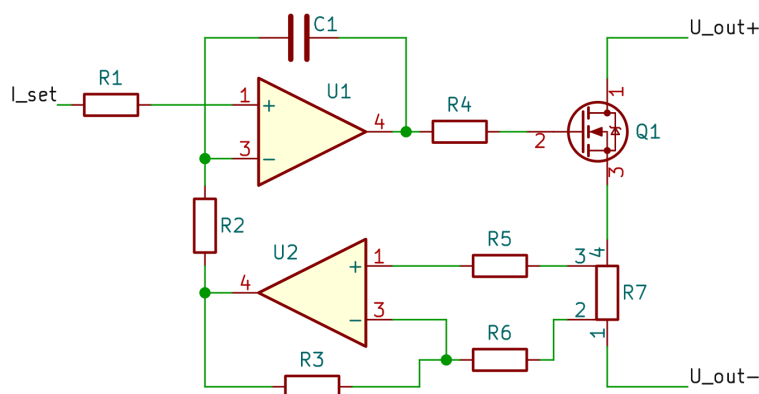
Tato zátěž je určena pro měření kapacity a chování baterie při vybíjení. V některých případech by bylo lepší měřit baterie spíše metodou konstantního výstupního výkonu. Zpravidla zařízení odebírá konstantní výkon. Pokud by bylo toto měření vyžadováno, je možné ho realizovat s poměrně malou chybou metodou CC a úpravou odebíraného proudu v závislosti na napětí. Rychlost těchto úprav by při měření baterií neměla být kritická, tedy tuto úpravu může obstarat μP .

Zjednodušené schéma zátěže je na obr. 4.9. Označení U_{out+} a U_{out-} představují výstupní svorky zařízení, tedy svorky ke kterým se připojuje baterie, nebo testované zařízení. Proud zátěží je regulován tranzistorem $Q1$, který pracuje v lineárním režimu. Tranzistor je ovládán operačním zesilovačem $U1$, který pracuje jako rozdílový zesilovač. Nastavené napětí I_{set} je porovnáváno s napětím na výstupu operačního zesilovače $U2$. Kondenzátor $C1$ je určen pro zpomalení (integraci) výstupu OZ. Využití $C1$ je pro případ nestability regulační smyčky. Operační zesilovač $U2$ měří úbytek napětí na rezistoru $R7$, který je přímo úměrný protékajícímu proudu. Rezistor $R7$ je přesný měřicí rezistor s velmi malou tepelnou závislostí. Z toho důvodu se jedná o rezistor malé hodnoty $0,2\ \Omega$. To klade velké nároky na operační zesilovač. Maximální napětí na rezistoru je $U_{R7max} = 0,2\ \text{V}$ (4.5). Pokud bychom chtěli stabilní proud na $I_{min} = 1\ \text{mA}$, musí být operační zesilovač schopen rozlišit $U_{min} = 0,2\ \text{mV}$. Použitý operační zesilovač LTC2050HVCS8 má vstupní napěťový offset typicky $U_{offset} = 0,5\ \mu\text{V}$. Měl by být tedy teoreticky schopen udržet proud s přesností $I_{st} = 25\ \mu\text{A}$. Tato přesnost je však jen teoretická, reálně je možno počítat s minimálně desetinnásobnou $250\ \mu\text{A}$. Ovšem i tato přesnost by měla být dostatečná.

$$U_{R7max} = I_{max} \times R7 = 10 \times 0,02 = 0,2\ \text{V} \quad (4.5)$$

$$U_{min} = I_{min} \times R7 = 0,001 \times 0,02 = 0,2\ \text{mV} \quad (4.6)$$

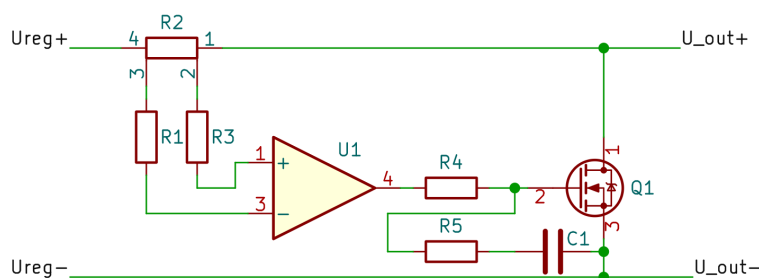
$$I_{st} = \frac{U_{offset}}{R7} = \frac{0,5 \times 10^{-6}}{0,02} = 25\ \mu\text{A} \quad (4.7)$$



Obrázek 4.9: Zjednodušené schéma zátěže CC

Zátěž realizující CV (Constant Voltage)

Režim konstantního napětí je určen pro simulaci baterie. V tomto režimu je nutné, aby veškerá přebytečná energie dodávaná jako nabíjení baterie, byla přeměněna na teplo. Zároveň je nutné, aby zařízení bylo schopno dodávat energii jako simulaci vybíjení. Mezi těmito režimy by měla být možnost libovolně přecházet. Navržená elektronická zátěž CV je uzpůsobena pro tento provoz. Základní schéma je na obr. 4.10. Princip je založen na měření procházejícího proudu z a do zařízení. V případě, že proud teče ze zařízení, je na rezistoru $R2$ napětí, jehož kladná strana je na pinu 4. Operační zesilovač má v záporném vstupu vyšší napětí než na kladném, na výstupu je záporné napájecí napětí. Tranzistor je zcela uzavřen. V případě, že na výstupu zařízení je vyšší napětí než je nastavené, proud by měl téci do zařízení. To se projeví vyšším napětím na rezistoru $R2$, jehož kladná strana je na pinu 5. Operační zesilovač má v tomto případě vyšší napětí na kladném vstupu. Na výstupu je kladné napájecí napětí. Tranzistor je otevřen a umožní proudu odtéci do země. Tím se na výstupu zařízení udržuje konstantní napětí a zároveň je možné odebírat energii.



Obrázek 4.10: Zjednodušené schéma zátěže CV

4.3 Řídící obvody

Řídící obvod je určen k nastavování výstupů, měření vstupů a komunikaci s PC nebo uživatelem. Jako řídicí obvod jsem zvolil STM32F427VGT6. Jedná se o 32 bitový μ P typu ARM.

Čip již obsahuje potřebné periferie pro nastavování, měření a komunikaci. Pro nastavování výstupního napětí a proudu bude využit 12bit D/A převodník. Rozlišení nastavení výstupního napětí bude přibližně $U_{SCALE} = 5 \text{ mV}$ 4.8. V případě nastavení výstupního proudu bude rozlišení $I_{SCALE} = 2,44 \text{ mA}$. Pro měření jsou využity také 12bit A/D převodníky. Rozlišení je tedy stejné.

$$U_{SCALE} = \frac{U_{OUTMAX}}{2^{12}} = \frac{21}{4096} = 5,13 \text{ mV} \quad (4.8)$$

$$I_{SCALE} = \frac{I_{OUTMAX}}{2^{12}} = \frac{10}{4096} = 2,44 \text{ mA} \quad (4.9)$$

Komunikace s PC je možná přes USB periferii bez nutnosti externího převodníku. Použitý μP má dostatek GPIO pinů pro komunikaci s uživatelem (display, button).

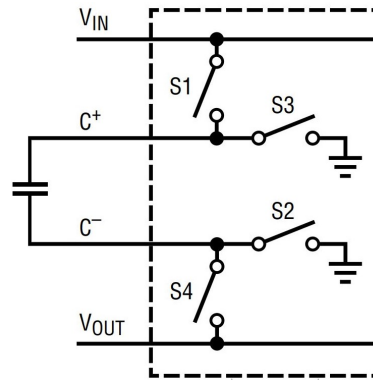
4.4 Pomocné obvody

Napájení regulátoru je nutné 12 V, 5 V, 3,3 V, a symetrické napájení OZ $\pm 5 \text{ V}$.

Stejnoseměrná napětí jsou zajištěna pomocí lineárních stabilizátorů.

- L78M05ABDT-TR pro 12 V
- L78M05ABDT-TR pro 5 V
- AP2127K-3.3 pro 3,3 V

Zdroj symetrického napětí je náročnější. K vytvoření záporného napětí z kladného napětí je zde využit princip nábojové pumpy. Nábojová pumpa je druh spínaného DC/DC měniče. Princip je vysvětlen na obr. 4.11. Na obrázku je V_{IN} vstupní napětí a V_{OUT} výstupní napětí. Na pinu $C+$ a $C-$ je připojen keramický kondenzátor. Pracovní smyčka má dva kroky. Nejprve se sepnou spínače $S1$ a $S2$. Kondenzátor se nabije napájecím napětím V_{IN} a spínače $S1$ a $S2$ se rozepnou. V dalším kroku se sepnou spínače $S3$ a $S4$, tedy kladná strana kondenzátoru je připojena na zem zařízení a záporná na výstup V_{OUT} . V tuto chvíli je na výstupu V_{OUT} záporné napájecí napětí. [43]



Obrázek 4.11: Princip nábojové pumpy [28]

Jedná se o relativně jednoduchý způsob, jak vytvořit záporné napájecí napětí, ale z principu není vhodný pro větší proudy.

V zařízení je použit čip LTC3260 obsahující spínací i řídicí obvody, je nutné pouze doplnit požadovaný kondenzátor a nastavovací rezistory. Čip obsahuje mód šetření energií. Zařízení bude napájeno z rozvodné sítě, tento mód je tedy trvale vypnutý. Pracovní frekvence spínání je vhodná co nejvyšší, pro minimalizaci výstupního zvlnění, proto je nastavena na maximální hodnotu 500 kHz. Výstupní napětí je nastaveno odporovým děličem na výstupu. Napětí je dáno vztahem 4.10 a je nastaveno na ± 5 V. [28]

$$\pm U_{LDO} = \pm 1,2 \times \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \quad (4.10)$$

Zdrojem napěťové reference je čip REF3125AIDBZT v pouzdře SOT-32-3. Jedná se o 2,5 V napěťovou referenci s malou teplotní závislostí 20 ppm/°C. Počáteční přesnost je 0,2%. Protože DPS μ P a regulátoru jsou oddělené, má každá vlastní referenci. [34]

Kapitola 5

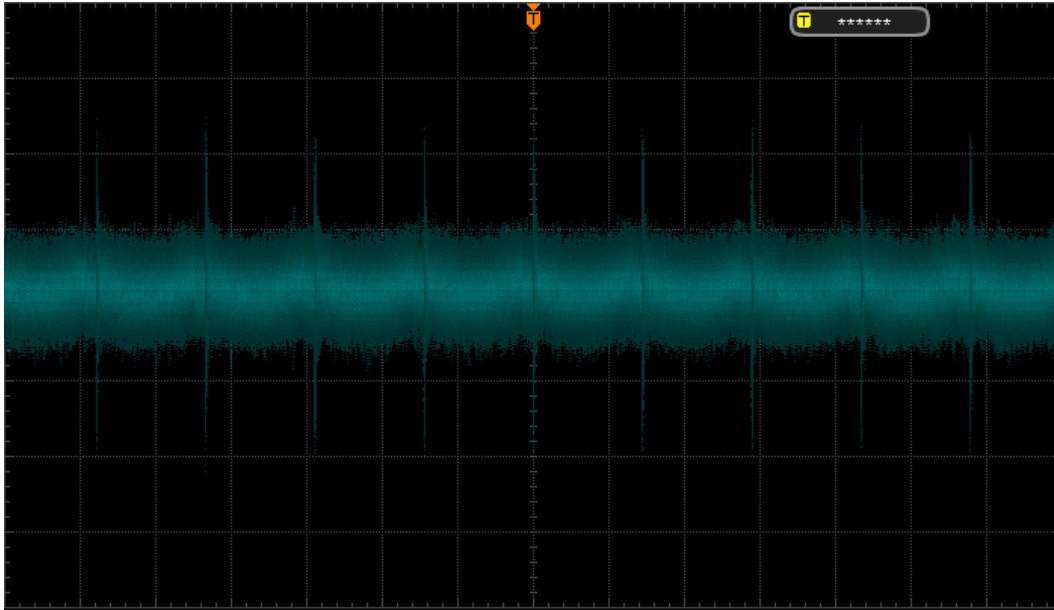
Testování

V této kapitole jsou popsány měřené parametry jednotlivých částí zařízení a výsledky měření. Pokud byly výsledky neuspokojivé, je zde popsán způsob úpravy obvodů jednotlivých částí zařízení pro zlepšení výsledků, včetně výsledků měření po úpravách obvodů.

5.1 Před-regulátor

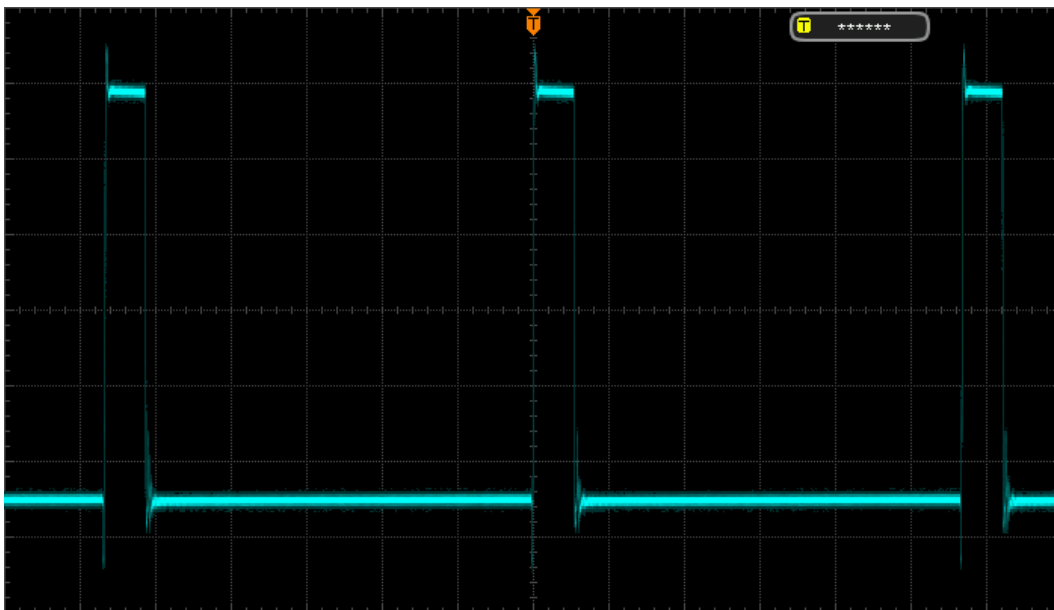
První osazená deska před-regulátoru vykazovala velké výstupní zvlnění a nestabilitu výstupního napětí. Tento problém se částečně vyřešil dosazením pomocné kompenzace skládající se z rezistoru $R3 = 100\text{ k}\Omega$ a kondenzátoru $C17 = 1\text{ nF}$. I přes zlepšení bylo stále výstupní napětí značně nestabilní. Po několika testech přestal před-regulátor reagovat na jakékoli změny. Pravděpodobně došlo k nějaké neočekávané chybě, ovládací čip mohl být vadný již z výroby. Pravděpodobnější variantou je chyba při pájení čipu, kdy zůstaly zbytky pájecí pasty mezi vývody čipu. Tato deska byla označena za vadnou a vyřazena.

Druhá deska byla osazena s použitím jiné pájecí pasty a po pájení pečlivě umyta v isopropylalkoholu. Výstupní zvlnění je zobrazeno na obr. 5.1. Na průběhu jsou patrné napěťové špičky až 250 mV s frekvencí přibližně 333 kHz 5.1. To odpovídá spínací frekvenci zdroje. Spínání dolního tranzistoru, označeného S2 na obr. 4.2, je na obr. 5.2. Frekvence spínání 353 kHz 5.2 přesně neodpovídá předchozímu obrázku. To může být způsobeno nepřesností řídicího obvodu, který frekvenci nedrží přesně, nebo nepřesností měření.



Obrázek 5.1: Výstupní šum před-regulátoru (2 μs /dílek, 100 mV/dílek)

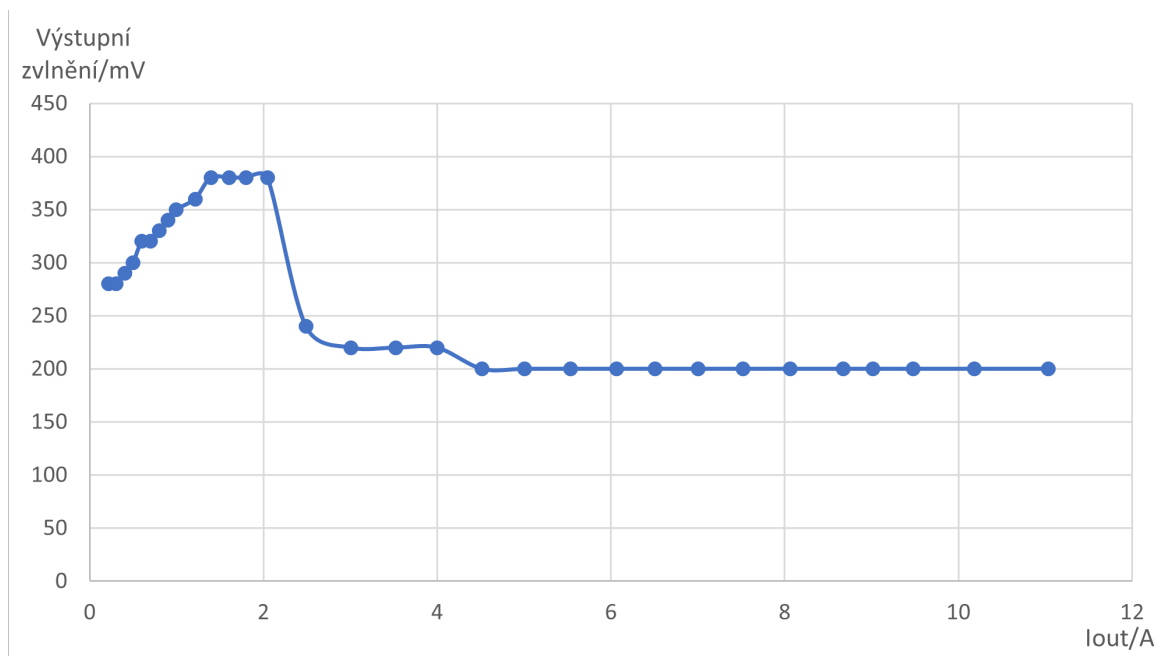
$$f_P = \frac{1}{2 * 1,5 * 10^{-6}} \approx 333333 \text{ Hz} \quad (5.1)$$



Obrázek 5.2: Spínání S2 tranzistoru (500 ns/dílek, 1 V/dílek)

$$f_P = \frac{1}{5,66 * 500 * 10^{-9}} \approx 353357 \text{ Hz} \quad (5.2)$$

Výstupní zvlnění napětí zdroje není konstantní, ale mění se v závislosti na výstupním proudu. Závislost výstupního zvlnění napětí na výstupním proudu je na obr. 5.3. Z grafu je patrné, že maximální zvlnění je kolem 1-2 A a dosahuje hodnot až 400 mA. To je již velké zvlnění a při použití samotného spínaného zdroje by bylo nepřijatelné. V tomto případě toto zvlnění vyrovná regulátor.

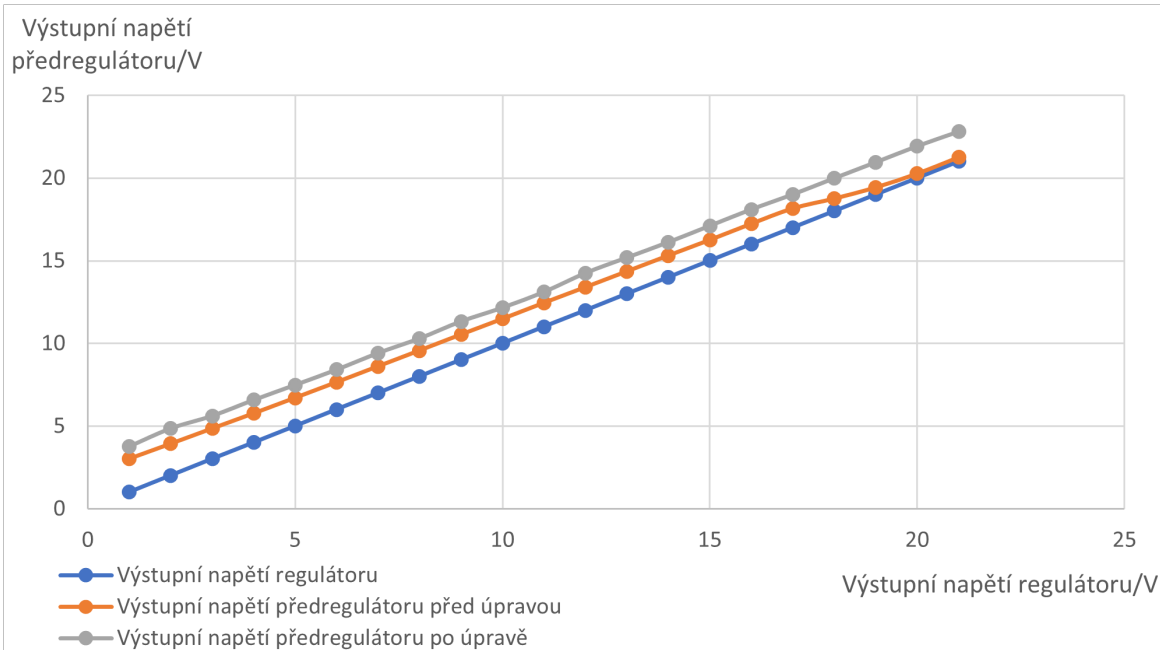


Obrázek 5.3: Závislost výstupního zvlnění napětí na výstupním proudu

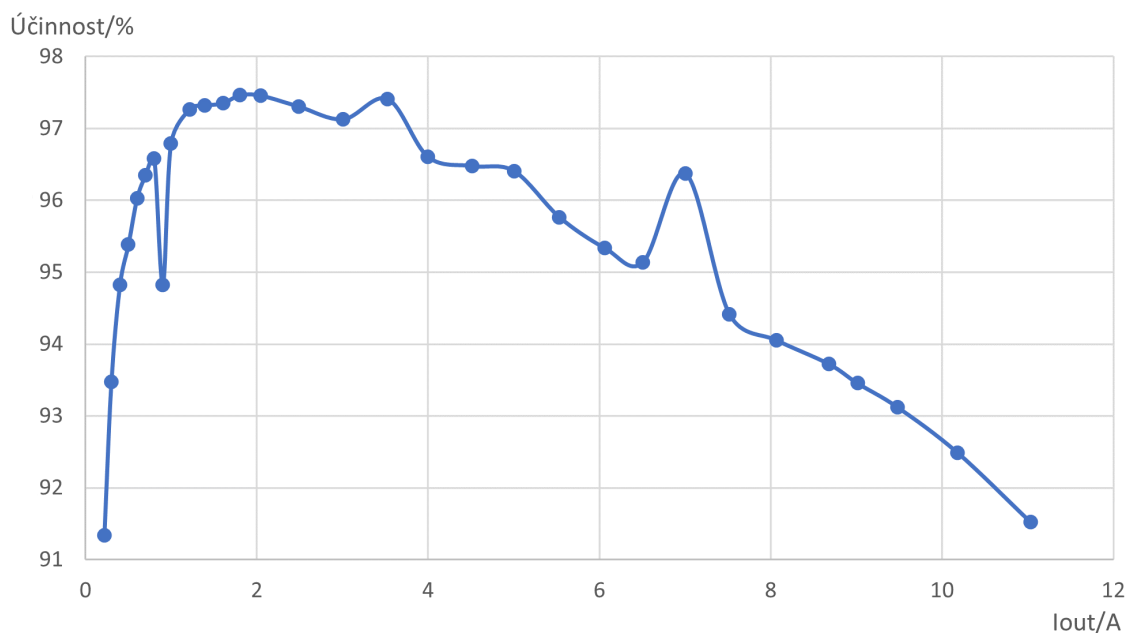
Nastavování výstupního napětí před-regulátoru uvedené na obr. 4.4 bylo nutné upravit. Původní nastavení rezistoru $R4 = 100 \text{ k}\Omega$ neposkytovalo dostatečné předpětí na regulátor. V nejhorším případě poskytovalo pouze 253 mV. Toto předpětí zdaleka nedostačovalo pro správný chod regulátoru. Na obr. 5.4 je předchozí stav vyznačen oranžovou křivkou. Po úpravě rezistoru $R4 = 49,5 \text{ k}\Omega$ se zvětšilo předpětí na nejmenší hodnotu 1,805 V. V grafu na obr. 5.4 je nová konfigurace vyznačena šedivou křivkou. Pro porovnání je v grafu na obr. 5.4 i výstupní napětí regulátoru reprezentované modrou křivkou. Napětí 1,805 V je sice hraniční hodnota, ale je stále dostatečná pro správnou funkci regulátoru. S touto změnou se zvýšilo i maximální předpětí u malých hodnot na maximální hodnotu 2,753 V. To vede ke zvýšení maximálního ztrátového výkonu na tranzistoru regulátoru na 17,53 W 5.3, a je nutné uzpůsobit chlazení této skutečnosti.

$$P_{ZTRATMAX} = (U_{IN} - U_{OUT}) \times I_{OUT} = (2,753 - 1) \times 10 = 17,53 \text{ W} \quad (5.3)$$

Účinnost před-regulátoru v závislosti na výstupním proudu je na obr. 5.5. Křivka účinnosti je podobná křivce udávané v datasheetu k použitému obvodu SiC461. Na křivce je patrné, že obvod zvládá provoz i na hodnotách proudu nad 10 A, pro které je navržen.

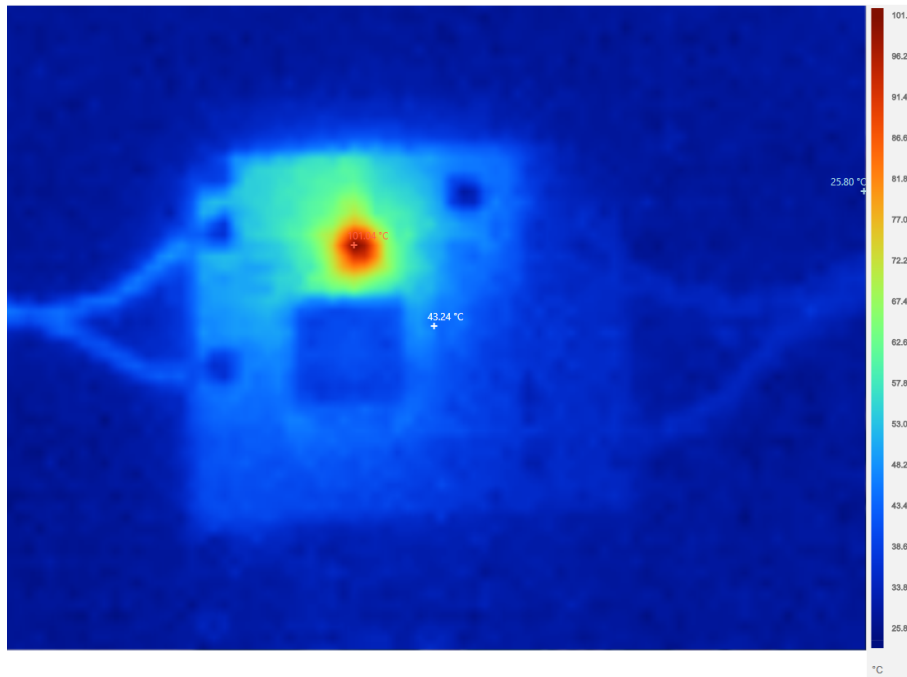


Obrázek 5.4: Porovnání původního nastavení předpětí regulátoru a nového nastavení



Obrázek 5.5: Účinnost před-regulátoru v závislosti na výstupním proudu

Přestože se jedná o spínaný zdroj s vysokou účinností, nejsou ztráty samotného zdroje zanedbatelné. Ztráty se projevují v ohřevu komponent i desky samotné. Snímky 5.6 byl pořízeny po půl hodině při zatížení 10 A. Na snímku je vidět, že největší výkonová ztrata je na čipu obsahující spínací tranzistory. Konečná hodnota teploty čipu se ustálila na hodnotě 101 °C. Maximální trvalá provozní teplota čipu

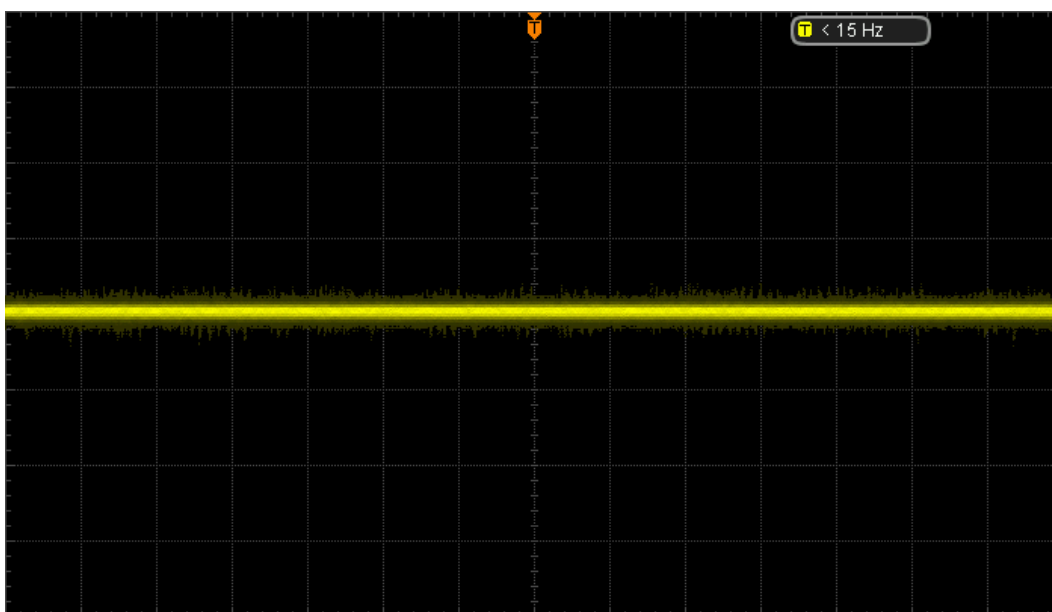


Obrázek 5.6: Snímek z termokamery dlouhodobě zatíženého před-regulátoru (obarveno dle teploty)

je 125 °C, není tedy nutné doplňovat před-regulátor chlazením. Cívka se ustálila na teplotě 45 °C, což je standardní provozní teplota. Teplota desky PCB překročila 43 °C. Materiál FR-4, ze kterého je vyrobena, bez problémů odolává teplotám do 130 °C. Problém by mohl nastat, pokud by byla deska blízko materiálům, které se deformují již při těchto teplotách, například některé typy plastů. [5]

5.2 Regulátor

Regulátor byl otestován na výstupní napětí od 1 V do 21 V a na výstupní proud 10 A. I při nejvyšším proudu a při nejnižším napětí (výstupní proud 10 A a výstupní napětí 1 V), nebyl problém uchlazení výkonový tranzistor pasivním chladičem. Hlavní důvod lineárního regulátoru, tedy eliminaci rušení ze spínaného zdroje, se podařilo dosáhnout. Výstupní zvlnění regulátoru je na obr. 5.7. Z průběhu je patrné, že výstupní zvlnění je vyšší než u běžných přístrojů pouze s lineárním regulátorem. Zobrazované zvlnění dosahuje hodnot přibližně 25 mV. Například laboratorní zdroj DIAMETRAL P230R51D udává maximální zvlnění 15 mV. [19]



Obrázek 5.7: Výstupní zvlnění regulátoru 500 ns/dílek, 50 mV/dílek)

5.3 Zátěž

5.3.1 Konstantní napětí (CV)

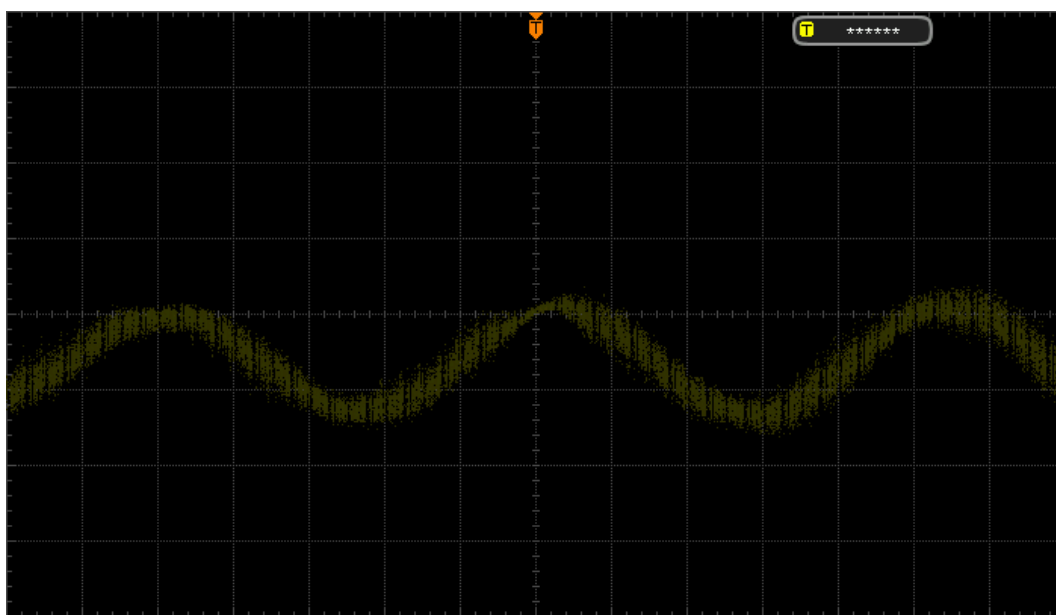
Při prvních testech se zátěž konstantního napětí lehce dostávala do kmitavého stavu. Viz obr. 5.8 Tento problém byl vyřešen dosazením RC článku $R13 = 1\text{ k}\Omega$ a $C6 = 1\text{ nF}$. Tím se kmitání dostalo na úroveň šumu. Viz obr. 5.9. Maximální testovaný proud byl 10 A s napětím 21 V. Pro tyto testy byl tranzistor chlazen aktivním chladičem.

5.3.2 Konstantní proud (CC)

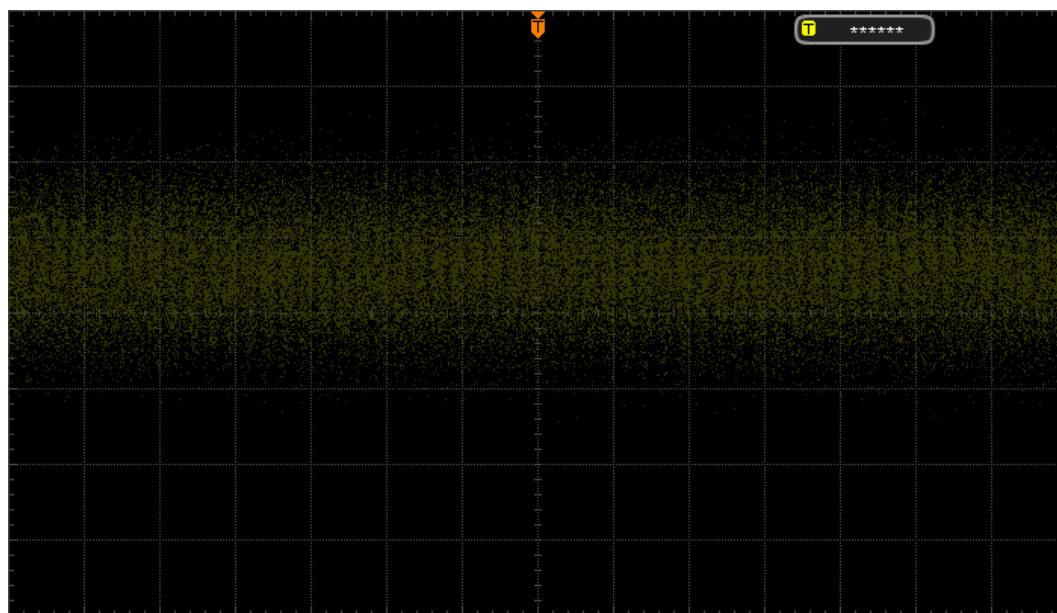
Zátěž konstantním proudem obdobně jako zátěž CV vykazovala nestabilitu procházejícího proudu. Průběh napětí měřeném na bočníku je na obr. 5.10. V tomto případě nestačil pouze RC článek $R19 = 1\text{ k}\Omega$ a $C17 = 1\text{ pF}$, ale bylo potřeba zavést integrační složku k operačnímu zesilovači U3. To bylo realizováno přidáním kondenzátoru $C14 = 120\text{ pF}$ do zpětné vazby operačního zesilovače. Průběh napětí je na obr. 5.11. Stejně jako zátěž CV, byla i CC zátěž chlazená aktivním chlazením.

5.4 Ovládání zařízení

Nastavování zařízení bylo při testech realizováno z počítače za pomoci D/A převodníků v mikroprocesoru STM32F427. Zařízení bylo také doplněno o několik ovládacích prvků a displej s informacemi o stavu zařízení. Komunikace s PC probíhala po sériové lince.



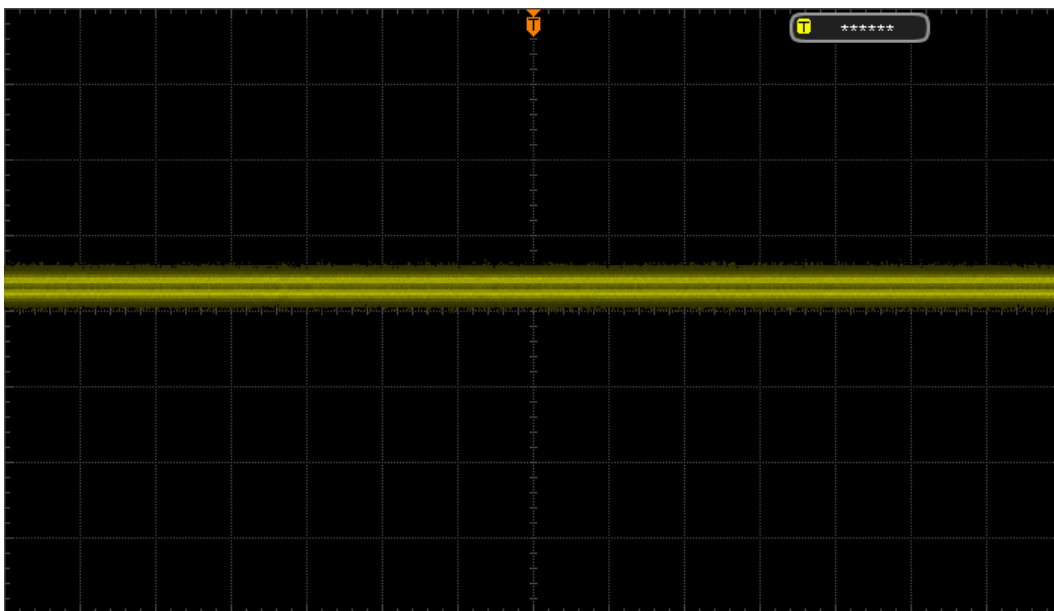
Obrázek 5.8: Kmitání zátěže CV bez RC článku 2 ns/dílek, 200 mV/dílek



Obrázek 5.9: Kmitání zátěže CV s RC článku 2 ns/dílek, 10 mV/dílek



Obrázek 5.10: Kmitání zátěže CC bez úprav 20 μs /dílek, 200 mV/dílek



Obrázek 5.11: Kmitání zátěže CC bez úprav 20 μs /dílek, 100 mV/dílek

Závěr

Smyslem práce bylo popsat běžně používané baterie a jejich chemii a navrhnout zařízení, které by bylo schopné změřit a následně simulovat jejich vlastnosti při testování zařízení, která by měla být těmito bateriemi napájena.

Práce je v první části zaměřena na charakteristiku nejčastěji používaných elektrochemických článků na bázi olova a lithia. Je zde popsána základní chemie těchto článků a rozdíly mezi nimi. Dále je zde vysvětlena problematika řazení článků do baterie a problémy spojené s touto praxí. Popsané jsou i některé aktivní i pasivní metody pro balancování článků. Práce také obsahuje přehled nejčastěji používaných ochranných elektrochemických článků.

Pro návrh přístroje je v práci popsáno několik možných topologií zařízení pro měření a simulaci baterií. Výsledná topologie obsahuje před-regulátor, regulátor a zátěž. Celé zařízení je řízeno mikroprocesorem STM32F427, který také umožňuje ovládání po sériové lince, nebo lokálně. Před-regulátor je spínaný zdroj a má za úkol, s vysokou účinností, snižovat vstupní napětí do regulátoru a tím omezit výkonové ztráty na regulátoru. Regulátor funguje na principu lineární regulace, která zajišťuje omezení výstupního zvlnění z před-regulátoru. Zátěž se stará o spotřebovávání energie, která by v reálných případech nabíjela baterii. Použitá topologie se jeví jako nejvýhodnější pro vysokou účinnost a nízké výstupní zvlnění. Výsledné zařízení se na výstupních svorkách umí chovat jako zdroj i zátěž, umí tedy napodobit chování baterie. Při dodávání energie pracuje jako zdroj (simulace vybíjení baterie) a při spotřebovávání energie pracuje jako zátěž (simulace nabíjení baterie).

Zařízení bylo otestováno. Prvotní výsledky testů nedosahovaly předpokládaných výsledků, proto jsou v práci popsány úpravy, které vedly k jejich zlepšení. Výsledné zařízení je tedy schopné měřit i simulovat baterie v rozsahu 1 V až 21 V a do 10 A. Výsledné výstupní zvlnění dosahuje hodnot 25 mV, což je již srovnatelná hodnota se sériově vyráběným zdrojem, který má maximální zvlnění 15 mV.

Tento tester a simulátor bateriových článků nabízí výhodný prostředek pro hodnocení vlastností baterií, který je nezbytný pro vývoj a zlepšování bateriových technologií a pro jejich použitelnost v různých aplikacích.

Bibliografie

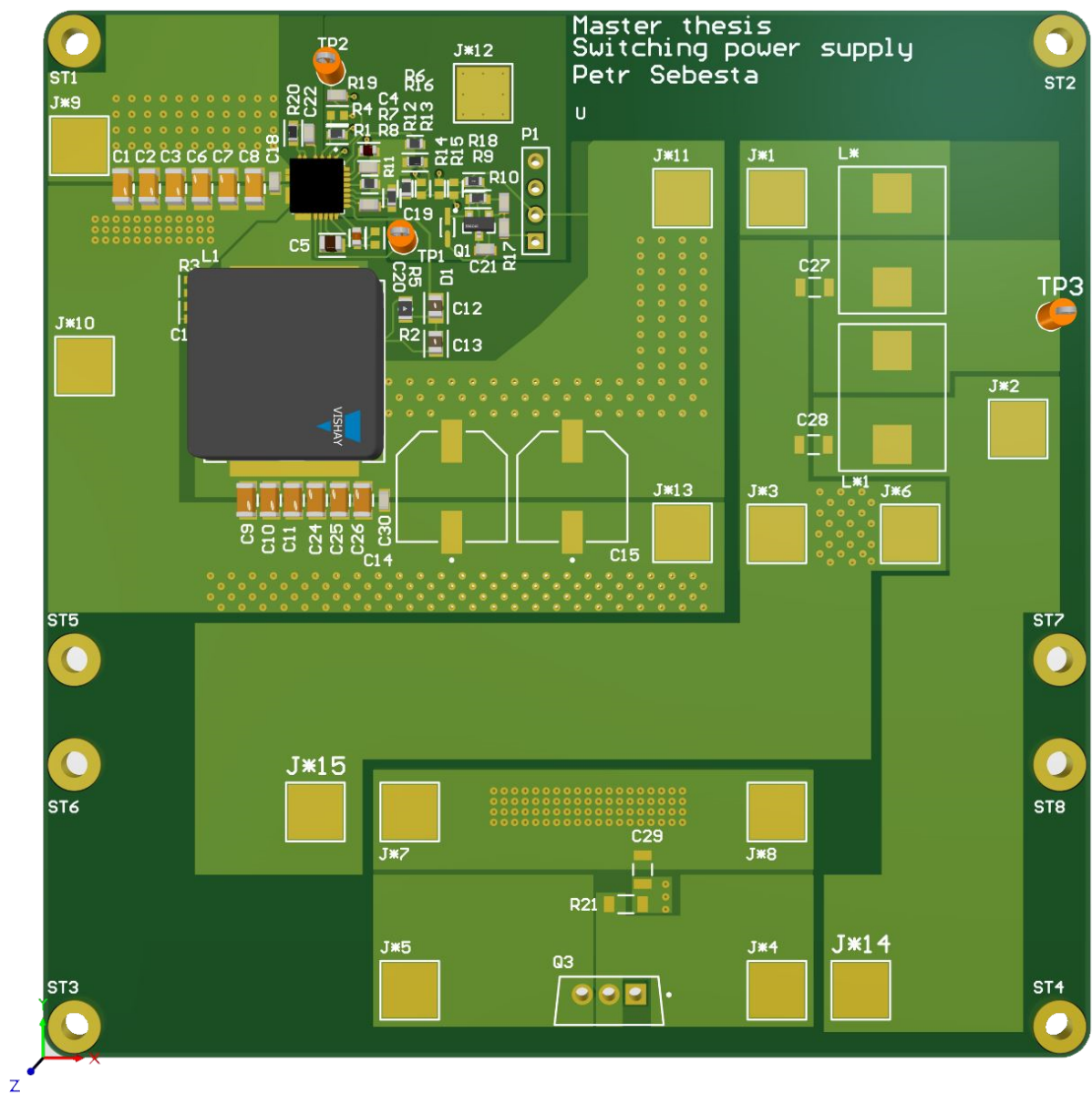
- [1] *4.5 V to 60 V Input, 2 A, 4 A, 6 A, 10 A microBUCK® DC/DC Converter*. 2022. URL: <https://www.vishay.com/docs/65124/sic46x.pdf>.
- [2] *4A, Standalone Li-ion Battery Charger IC With Photovoltaic Cell MPPT Function CN3791*. URL: https://www.laskakit.cz/user/related%5C_files/dse-cn3791.pdf.
- [3] *Abeceda baterií a akumulátorů*. Slaný. URL: <http://www.battex.info/slovnicek-a-pojmy/anoda>.
- [4] *Alkalický článek*. San Francisco (CA), 2023. URL: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Alkalick%C3%BD%5C_%5C%C4%8D1%5C%C3%A1nek%5C&oldid=22358113.
- [5] *Base Material*. URL: <https://j1cpcb.com/quote/pcbOrderFaq/Base%5C%20Material>.
- [6] *BU-103: Global Battery Markets*. 2021. URL: <https://batteryuniversity.com/article/bu-103-global-battery-markets>.
- [7] *BU-201: How does the Lead Acid Battery Work?* 2021. URL: <https://batteryuniversity.com/article/bu-201-how-does-the-lead-acid-battery-work>.
- [8] *BU-204: How do Lithium Batteries Work?* 2022. URL: <https://batteryuniversity.com/article/bu-204-how-do-lithium-batteries-work>.
- [9] *BU-205: Types of Lithium-ion*. 2021. URL: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>.
- [10] *BU-304: Why are Protection Circuits Needed?* 2021. URL: <https://batteryuniversity.com/article/bu-304-why-are-protection-circuits-needed>.
- [11] *Co je to separátor lithiové baterie? Jaké jsou základní materiály separátorů lithiových baterií?* 2021. URL: <http://m.cz.wisamp.com/info/what-is-a-lithium-battery-separator-what-are-63103163.html>.
- [12] *Convertidor reductor*. San Francisco (CA), 2021. URL: https://es.wikipedia.org/wiki/Convertidor%5C_reductor.
- [13] Ivan Cowie. *All About Batteries, Part 12: Lithium Titanate (LTO)*. Neu-Isenburg, 2015. URL: <https://www.eetimes.com/all-about-batteries-part-12-lithium-titanate-lto/>.
- [14] *EEVblog #329 - Tracking Pre-Regulator LTspice Simulation Part 2*. 2012. URL: <https://www.eevblog.com/forum/blog/eevblog-329-tracking-pre-regulator-ltspice-simulation-part-2/>.

- [15] *Goowei_OT_OTL_datasheet_2022*. Jesenice u Prahy, 2022. URL: http://www.battery-import.cz/user/documents/Goowei%5C_OT%5C_OTL%5C_datasheet%5C_2022.pdf.
- [16] *Inteligentní nabíječka autobaterií s mikroprocesorem*. Zlín, 2016. URL: <https://www.extol.cz/ke-stazeni/manuals/man/8897300.pdf>.
- [17] Azush Jain. *Battery configurations (series and parallel) and their protections*. URL: <https://www.engineersgarage.com/battery-configurations-series-and-parallel-and-their-protections/>.
- [18] Ali Reza Kamali. *Figure 1*. URL: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-chemical-reaction-of-the-lithium-ion-battery%5C_fig1%5C_268883225.
- [19] *LABORATORNÍ ZDROJ P130R51D DIAMETRAL*. Stará Turá. URL: https://meratest.sk/prilohy/E-Shop/04%5C_LABORATORNE%5C_ZDROJE/DC/P230%5C_R51D.pdf.
- [20] *Li-pol baterie*. URL: <https://www.rcprofi.cz/akumulatory-li-pol.html>.
- [21] *Lithium*. San Francisco (CA), 2023. URL: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium>.
- [22] *Lithium cobalt oxide*. San Francisco (CA), 2023. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lithium%5C_cobalt%5C_oxide%5C&oldid=1143208264.
- [23] *Lithium iron phosphate battery*. San Francisco (CA), 2023. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Lithium%5C_iron%5C_phosphate%5C_battery%5C&oldid=1147224869.
- [24] *Lithium Titanate Oxid Battery Cell LTO 2,3V 45AH Cylindrical*. URL: https://files.gwl.eu/inc/%5C_doc/attach/StoItem/7777/LTO-45AH-CY%5C_datasheet.pdf.
- [25] *Lithium-ion Batteries Part I: General overview and 2019 update*. 2019. URL: https://www.lightingglobal.org/wp-content/uploads/2019/06/Lithium-Ion%5C_TechNote-2019%5C_update-1.pdf.
- [26] *LITHIUM-ION BATTERY*. Seattle. URL: <https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/battery-technology/>.
- [27] *LT8584*. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/8584fb.pdf>.
- [28] *LTC3260*. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ltc3260.pdf>.
- [29] Marconi. *Skoro vše o akumulátorech a nabíjení*. Ústí nad Orlicí, 2008. URL: https://www.skola-auto.cz/wp-content/uploads/2019/06/Lux%5C_Akumulatory.pdf.
- [30] *NCR18650B*. 2012. URL: <https://www.batteryspace.com/prod-specs/NCR18650B.pdf>.
- [31] D. Pléha et al. *Separátory pro alkalické akumulátory*. Brno, 2012. URL: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/665/1/r6c1c2.pdf>.

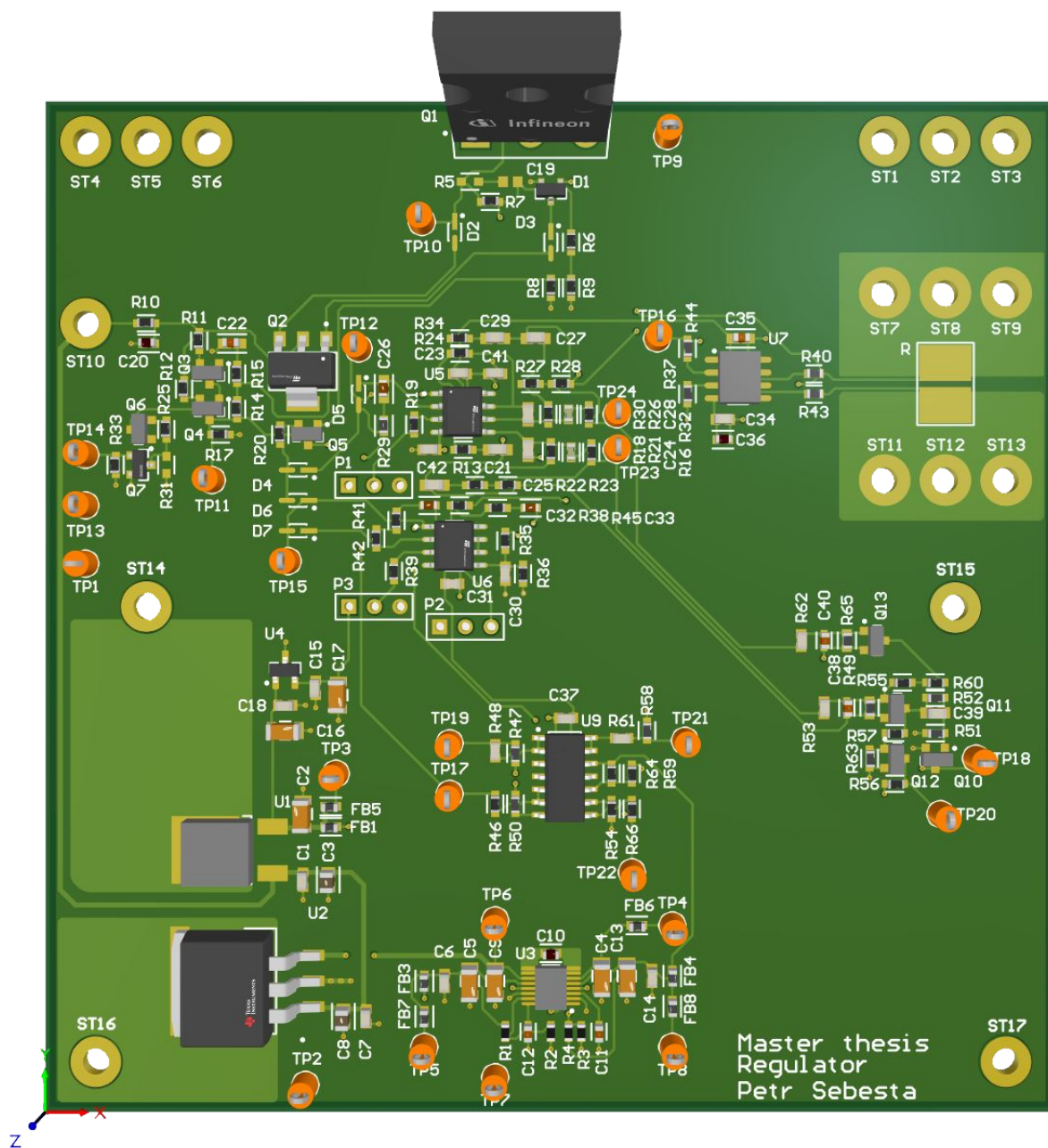
- [32] David Pléha. *Nanovláknenné separátory pro lithium-iontové akumulátory*. Diplomová práce. Brno, 2018. URL: <http://hdl.handle.net/11012/70289>.
- [33] Aswint Raj. *Cell Balancing Techniques and How to Use Them*. 2019. URL: <https://circuitdigest.com/article/cell-balancing-techniques-and-how-to-use-them>.
- [34] REF31xx 15ppm/°C Maximum, 100-μA, SOT-23 Series Voltage Reference. 2016. URL: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ref3125.pdf?ts=1680177754223%5C&ref%5C_url=https%5C%253A%5C%252F%5C%252Fwww.ti.com%5C%252Fproduct%5C%252FREF3125%5C%252Fpart-details%5C%252FREF3125AIDBZT.
- [35] Jaroslav Reichl a Martin Všetická. *Olověný akumulátor*. URL: <http://fyzika.jreichl.com/main/article/view/1707-oloveny-akumulator>.
- [36] S-11600. URL: <https://i.ebayimg.com/images/g/dwUAAOSwEW9j68rK/s-11600.jpg>.
- [37] Kevin Scott a Sam Nork. *Active Battery Cell Balancing*. URL: <https://www.analog.com/en/technical-articles/active-battery-cell-balancing.html>.
- [38] Aric Shelby. *HOW ARE LITHIUM IRON PHOSPHATE BATTERIES MADE?* 2021. URL: <https://rebelbatteries.com/blogs/lithium-iron-phosphate/how-are-lithium-iron-phosphate-batteries-made>.
- [39] *Technical specification Extreme Power LTO Cell ELERIX EX-T30K*. URL: https://files.gwl.eu/inc/%5C_doc/attach/StoItem/7875/ELERIX-EX-T30K-QuickDatasheet.pdf.
- [40] Tým VSelektro. *NABÍJENÍ AKUMULÁTORŮ - CHARAKTERISTIKY*. Boršice u Blatnice, 2020. URL: <https://www.vselektro.eu/nabijeni-akumulatoru-charakteristiky/>.
- [41] *What is SCiB*. URL: <https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib/about.html>.
- [42] *WINSTON lithiová baterie 12V/60Ah*. URL: <https://shop.gwl.eu/LiFeYP04-batteries-12V-1-1/WINSTON-Lithium-Battery-12V-60Ah-WB-LP12V60Ah.html%5C#tab3>.
- [43] Jana Žáková. *Stejnoseměrné měniče. Přednášky výkonová elektronika*. Liberec, 2016. URL: <https://docplayer.cz/8222759-Stejnosemerne-menice-prednasky-vykonova-elektronika.html>.

Příloha A

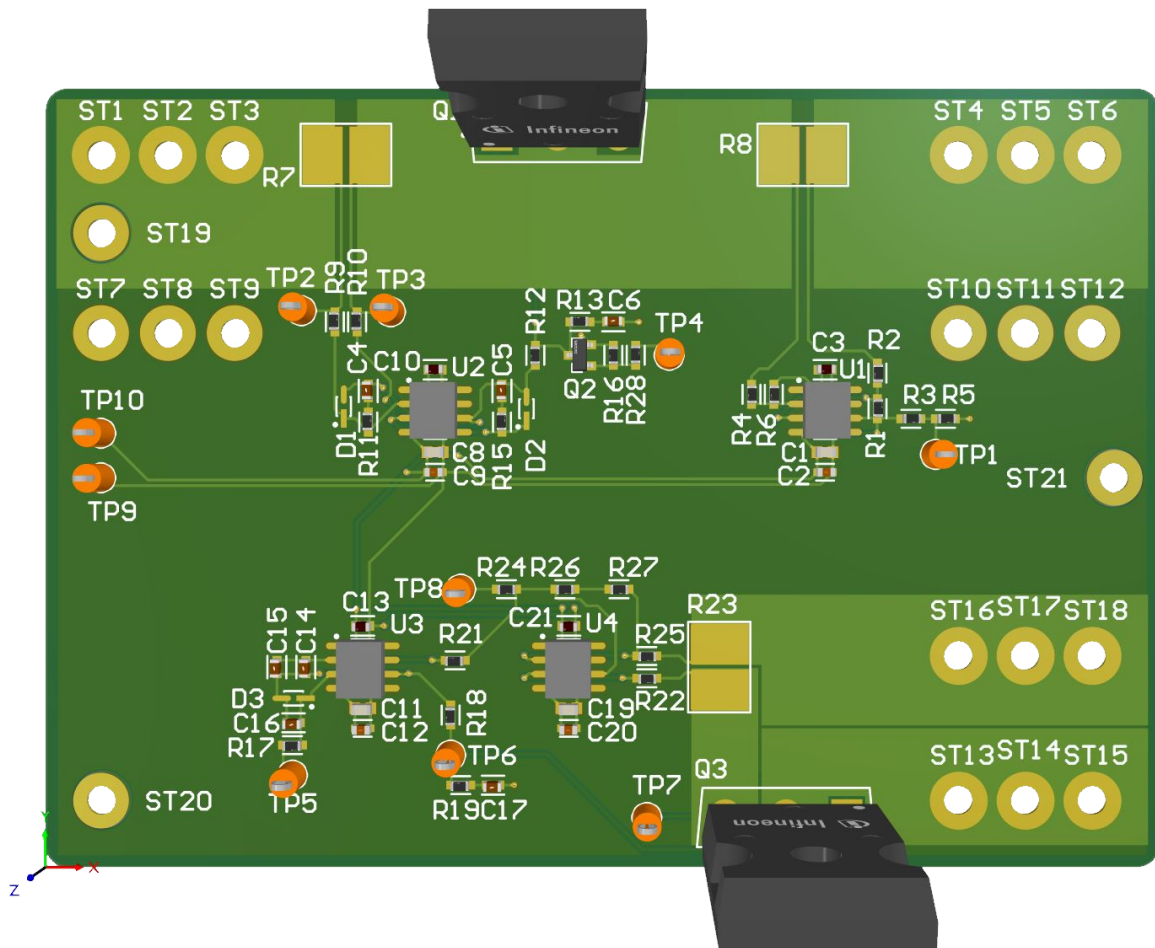
Obrázky desek plošných spojů



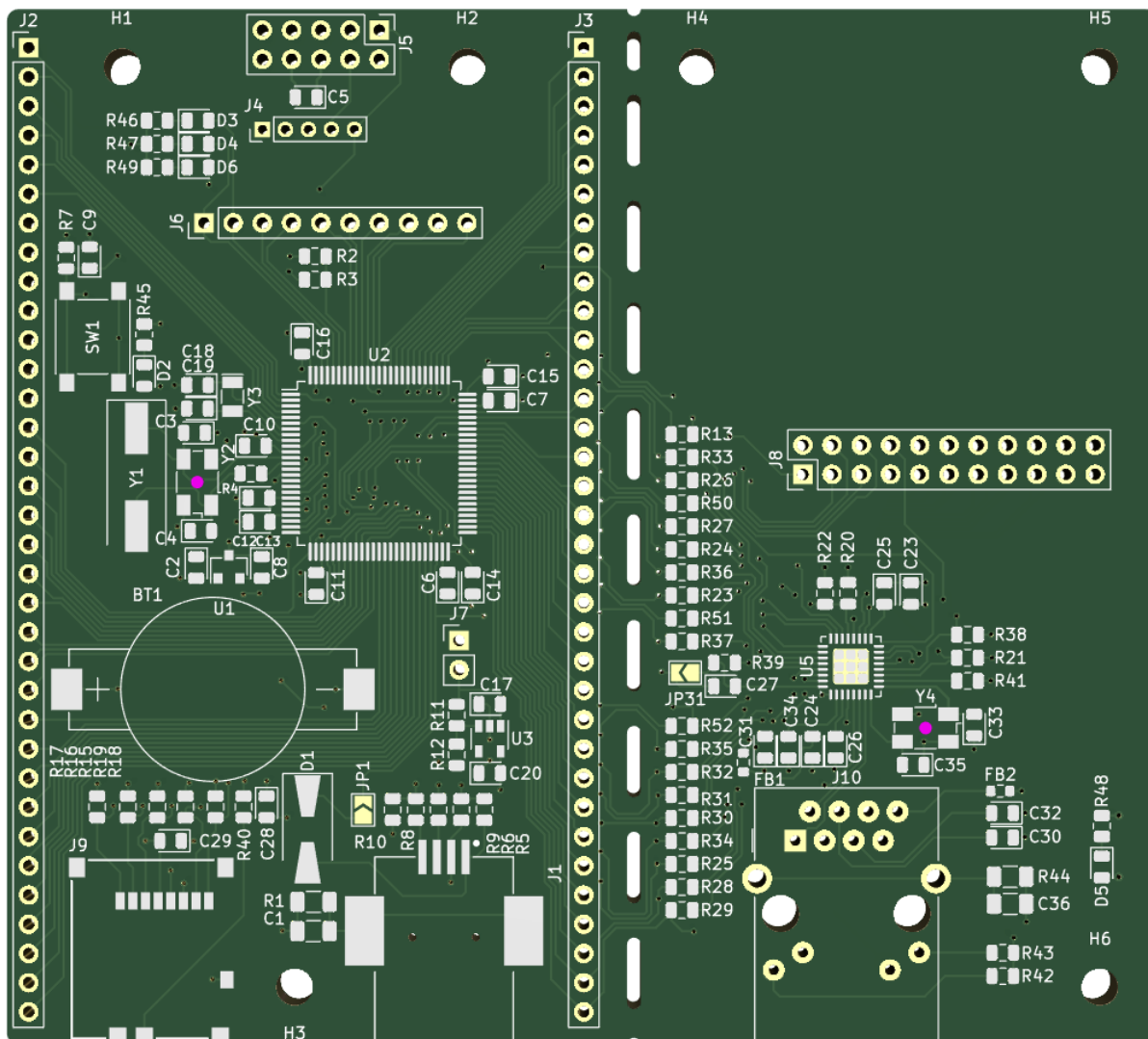
Obrázek A.1: PCB před-regulátoru



Obrázek A.2: PCB regulátoru



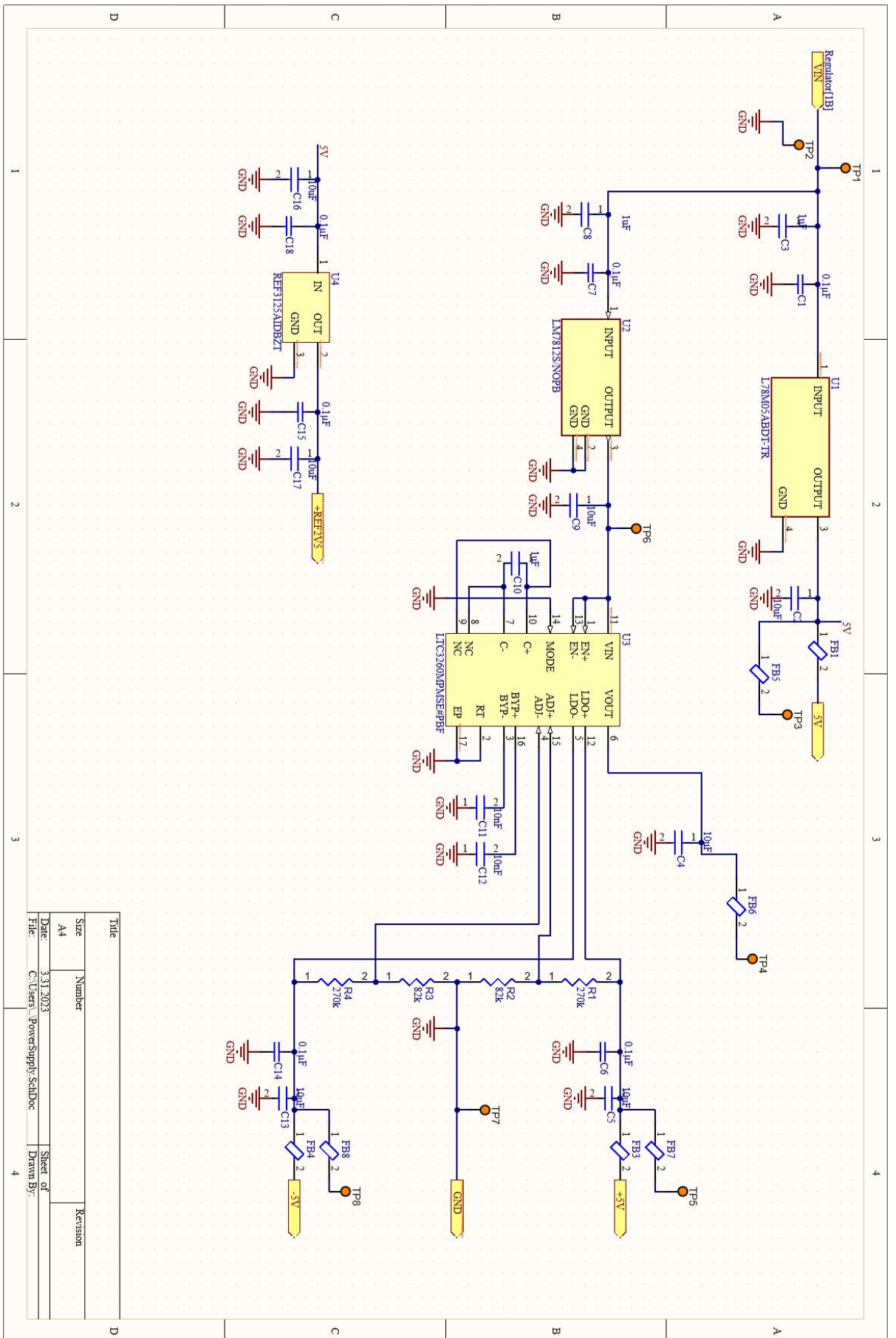
Obrázek A.3: PCB zátěže



Obrázek A.4: PCB řídicího modulu

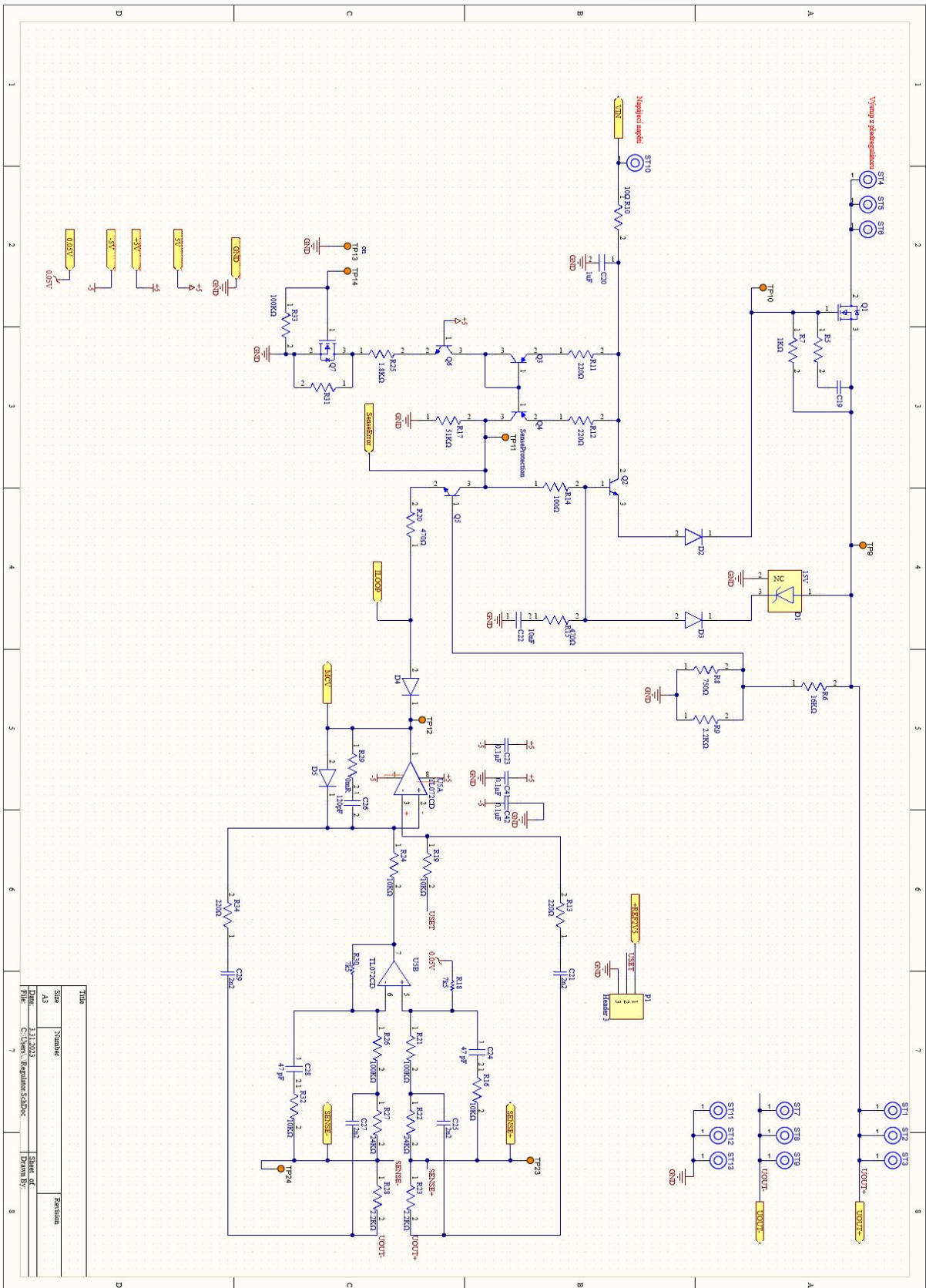
Příloha B

Schémata modulů zařízení

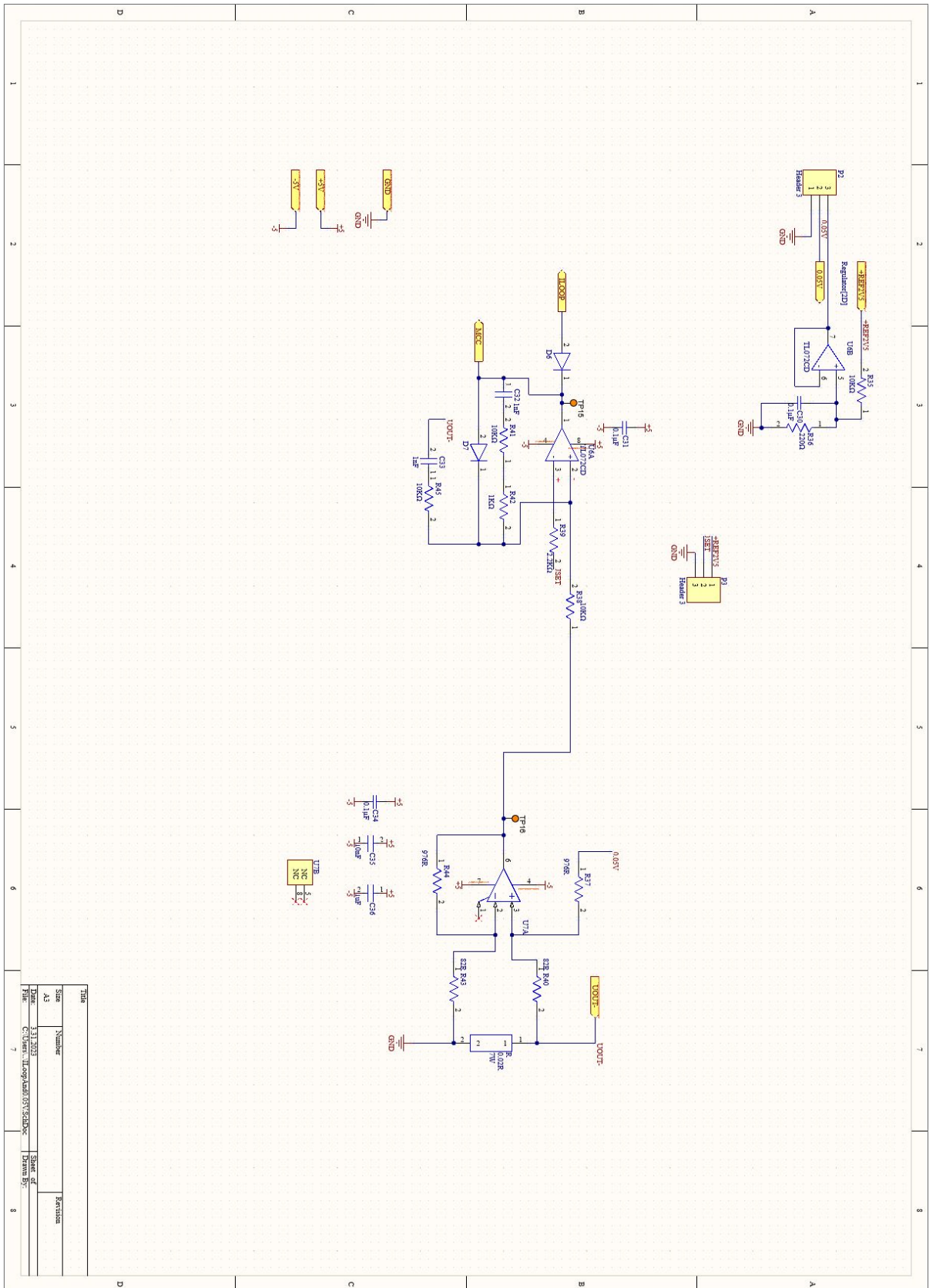


Title	Size	Number	Revision
	A4		
Date:	3.31.2023		
File:	C:\Users\...PowerSupply\SchDoc		
		Sheet of	
		Drawn By:	

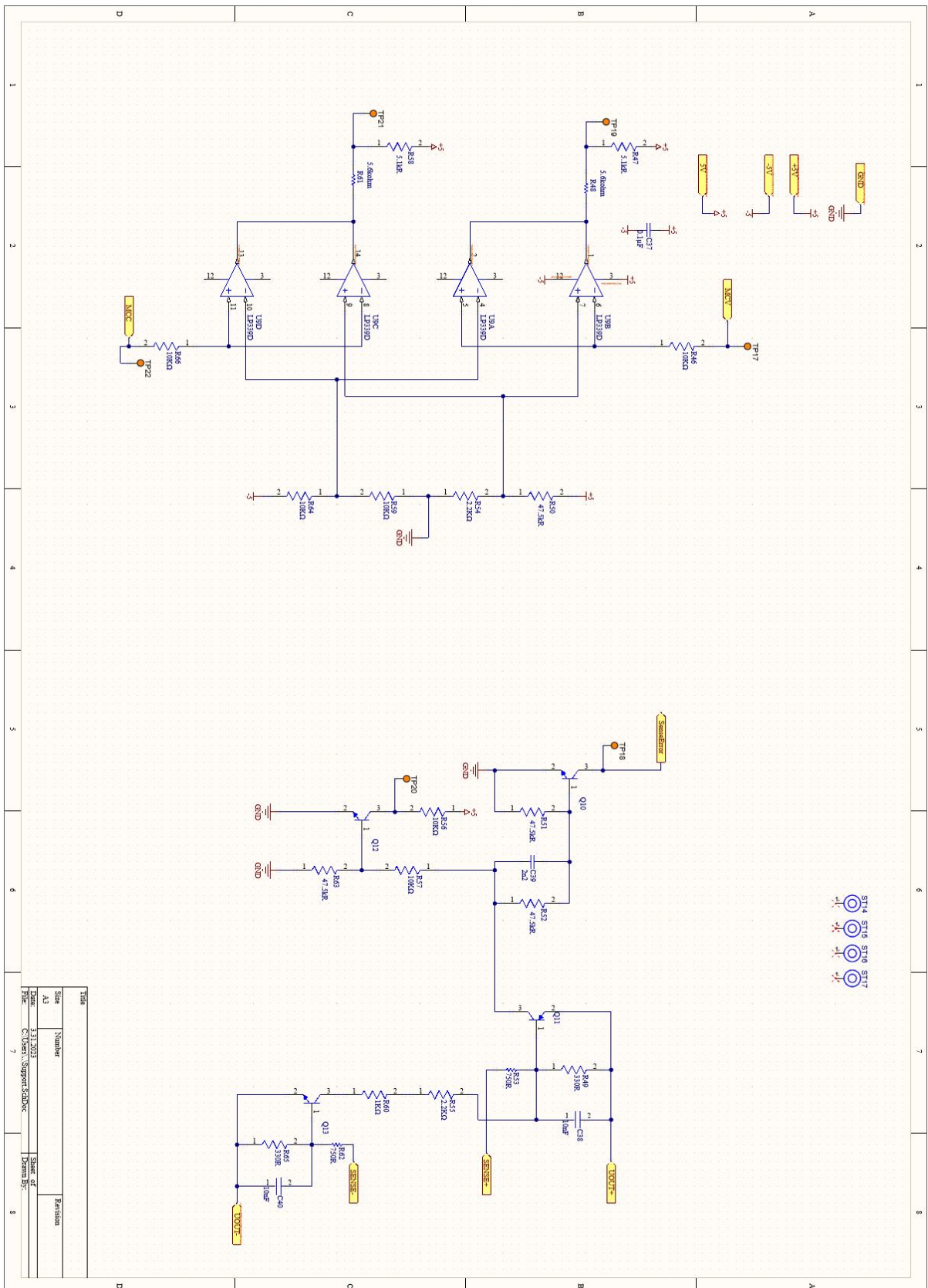
63
Obrázek B.2: Schéma regulátoru 1/4



Obrázek B.3: Schéma regulátoru 2/4

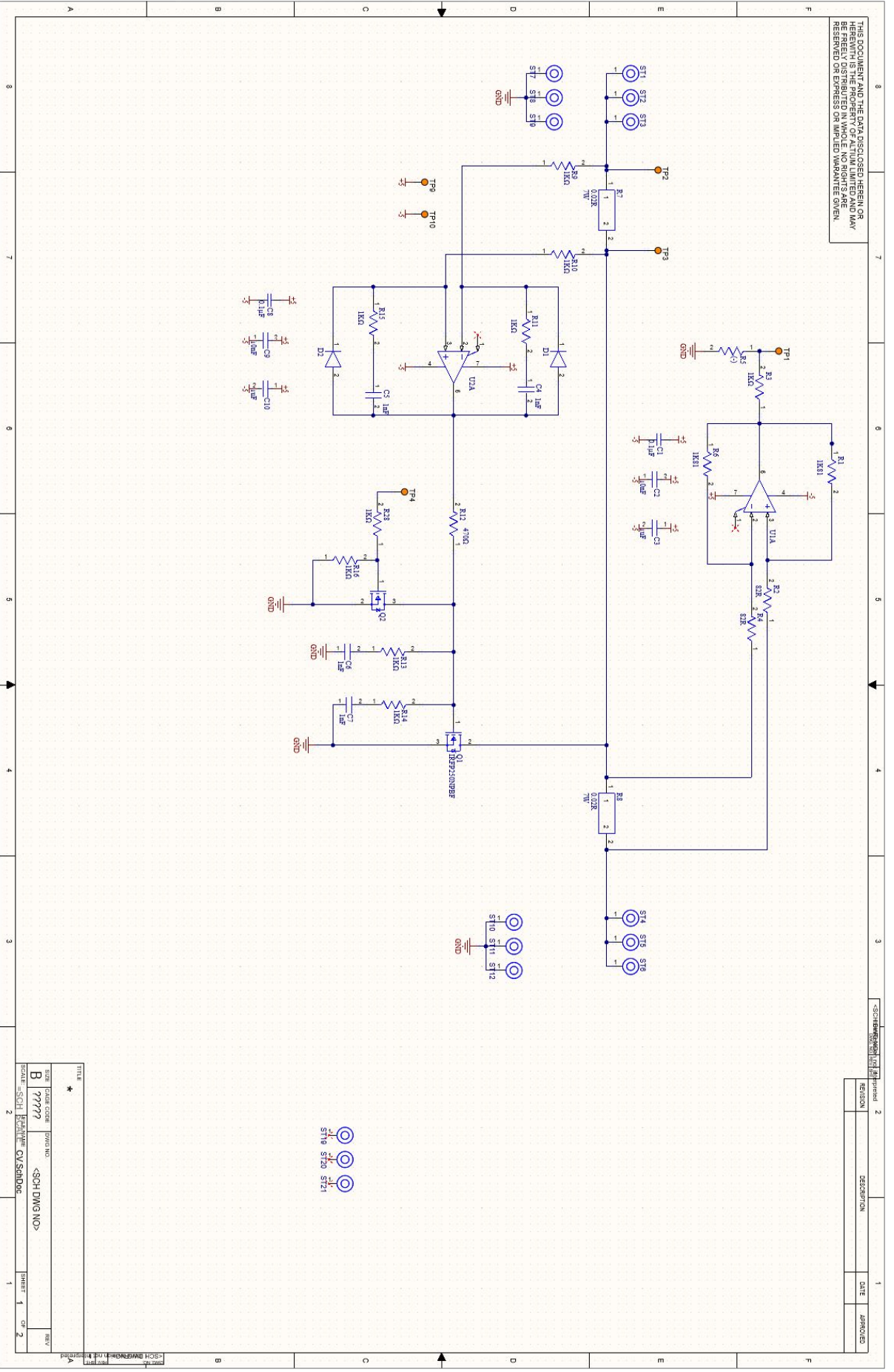


Obrázek B.4: Schéma regulátoru 3/4



Obrázek B.5: Schéma regulátoru 4/4

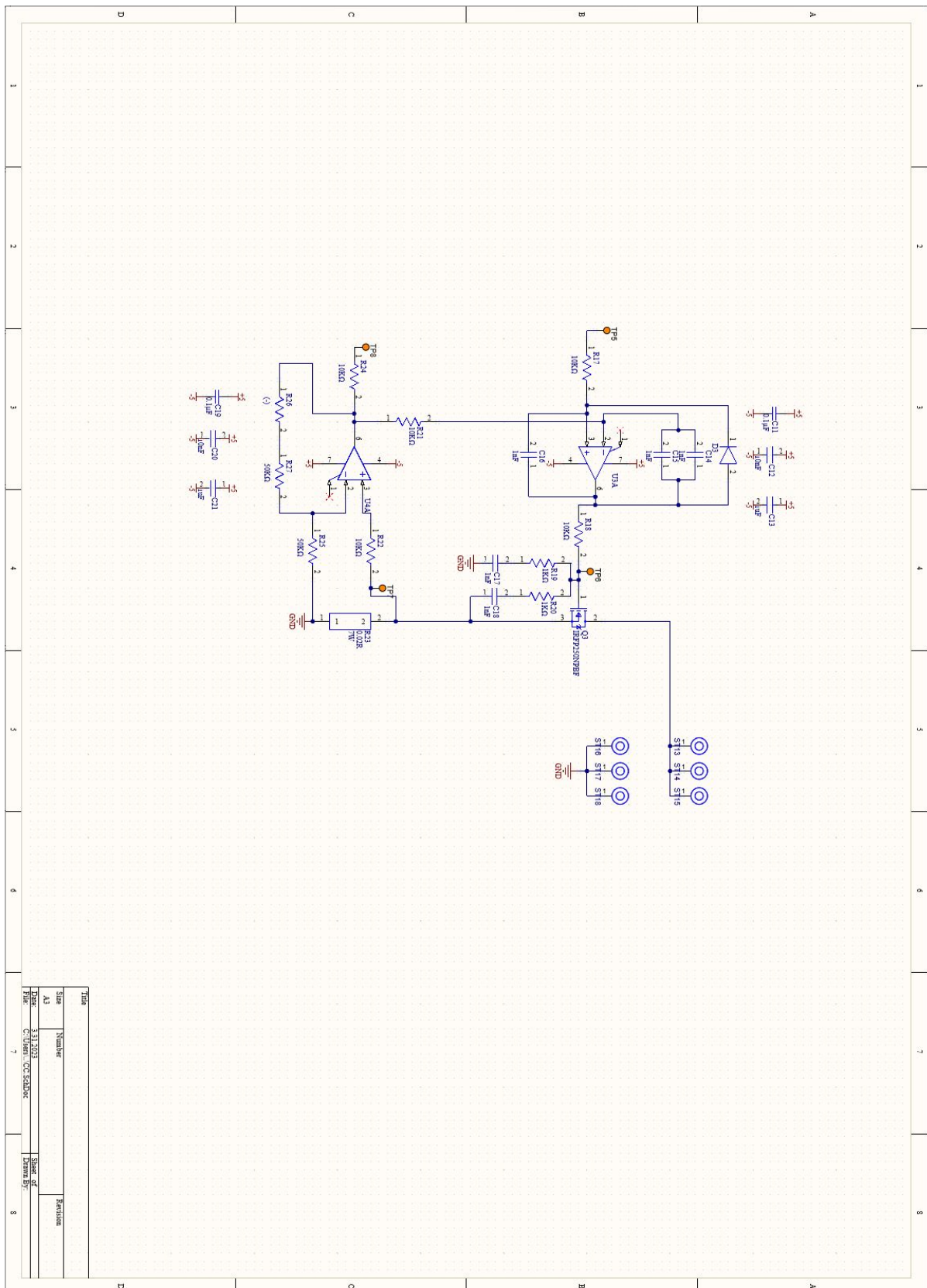
THIS DOCUMENT AND THE DATA DISCLOSED HEREIN OR BE FREELY DISTRIBUTED IN WHOLE OR IN PART. NO RIGHTS ARE RESERVED OR EXPRESS OR IMPLIED WARRANTIES GIVEN.



REVISION	DESCRIPTION	DATE	APPROVED
2			

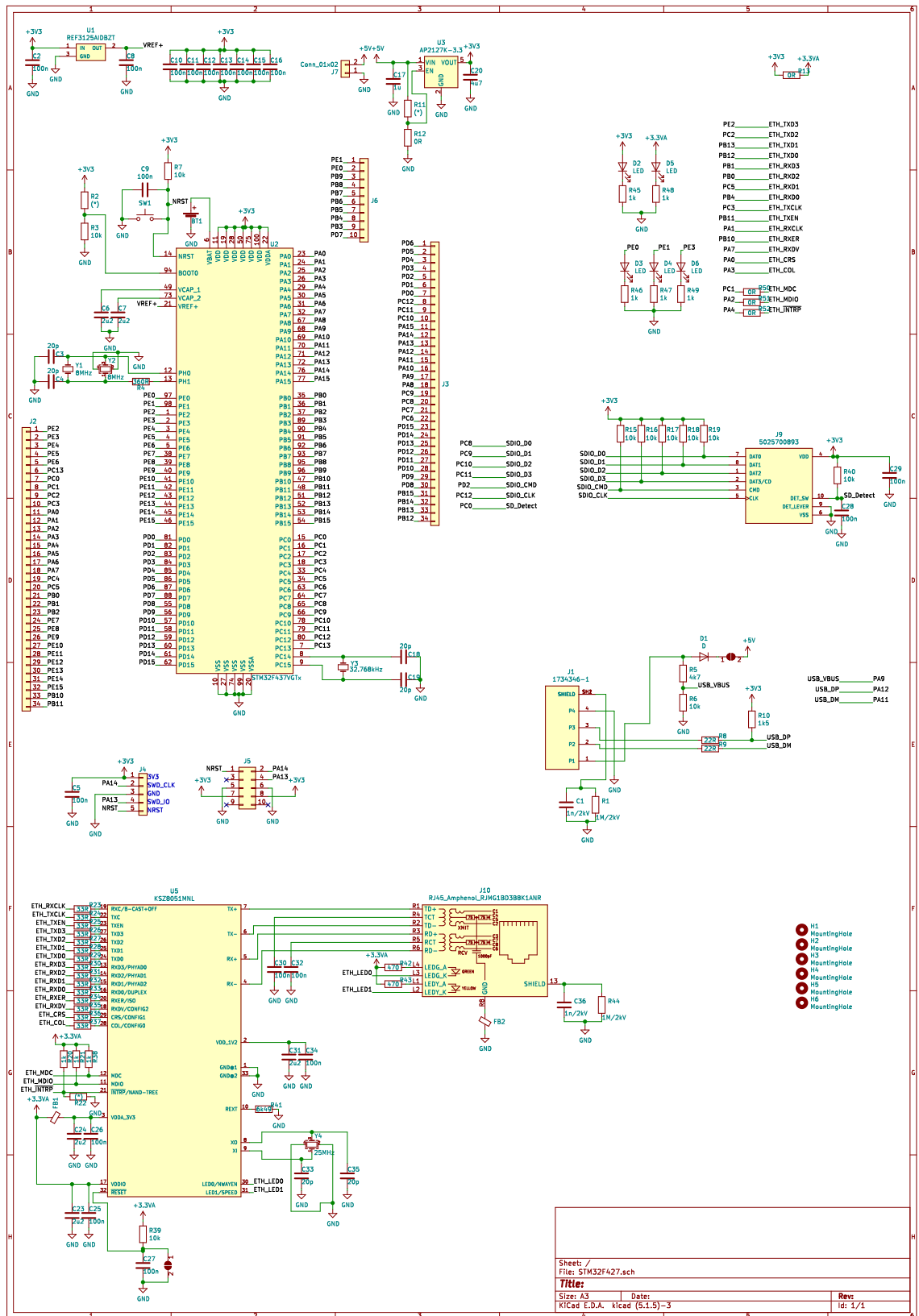
TITLE	*
SIZE	A
SCALE	1:1
DATE	2023.08.10
DWG. NO.	<SCH DWG. NO.>
DESIGNER	CY.SANDOR
CHECKER	
DATE	
SHEET	1
OF	2

Obrázek B.6: Schéma zátěže 1/2



Title	
Type	Number
A1	01/2023
File	C:\Users\CCS\Documents\CCS_SchDoc
Sheet of	Sheet 5
Page	7

Obrázek B.7: Schéma zátěže 2/2



Obrázek B.8: Schéma řídicího modulu