



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**NÁVRH ŘEŠENÍ HOT-SWAP VÝMĚNY HLAVNÍHO
AKUMULÁTORU MOBILNÍHO ROBOTU**

DESIGN OF HOT-SWAP OF MAIN ACCUMULATOR OF MOBILE ROBOT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Kandra

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Krejsa, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Tomáš Kandra
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	doc. Ing. Jiří Krejsa, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh řešení hot–swap výměny hlavního akumulátoru mobilního robotu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

U některých mobilních robotů existuje požadavek na nepřetržitý provoz, čehož je možné docílit pomocí výměny akumulátoru bez nutnosti vypínat a znovu zapínat palubní počítač a obslužnou elektroniku robotu (tzv. hot–swap). Podstatou práce je návrh řešení této úlohy pro konkrétní mobilní robot, vybavený LiFePo4 akumulátorem a palubním systémem založeným na ROS (Robotic Operating System).

Cíle bakalářské práce:

1. Zpracujte rešerši možných řešení hot–swap výměny akumulátorů mobilního robotu.
2. Vyberte vhodný princip řešení dle vámi navržených a odůvodněných kritérií.
3. Rozpracujte princip řešení do fáze konstrukčního návrhu.

Seznam doporučené literatury:

Linear Technology: Hot Swap Controllers, online at:
http://www.linear.com/products/hot_swap_controllers

MONK Simon: Make Your Own PCBs with Eagle: From Schematic Designs to Finished Boards,
McGraw-Hill Education Tab; 2nd ed. edition (10 July 2017)

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá analýzou problematiky a dostupných riešení hot-swap kontroléra, ktorý umožňuje výmenu primárneho zdroja na mobilnom zariadení BREACH bez prerušenia prevádzky operačného systému. V prvej časti sú zahrnuté metódy redundantného spájania akumulátorov a elektrické javy vznikajúce pri hot-swappingu. V druhej časti je popísaná tvorba schémy zapojenia, výroba dosky plošných spojov, voľba záložného zdroja a návrh vhodného nabíjacieho obvodu pre záložný zdroj. V poslednej je zhrnutý postup pre testovanie jednotlivých subsystémov ako aj celku z rôznych hľadísk.

Abstract

This thesis analyzes issues and available solutions of a hot-swap device, which allows the primary supply of mobile platform BREACH to be swapped without interrupting the operation of its components. The first part describes methods of redundancy and electrical phenomena during the hot-swap event. Second part describes creating schematics and PCB design of hot-swap controller, choice of backup power supply and design of its dedicated charger. Last part describes testing of the subsystems and complete system from multiple aspects.

Klíčové slová

Hot-Swap, Redundancia, FET-ORing, Li-Ion, Batéria, LTC4236, BREACH

Key words

Hot-Swap, Redundancy, FET-ORing, Li-Ion, Battery, LTC4236, BREACH

Bibliografická citácia

KANDERA, T. *Návrh řešení hot-swap výměny hlavního akumulátoru mobilního robotu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 41 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Krejsa, Ph.D..

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému „*Návrh řešení hot-swap výměny hlavního akumulátoru mobilního robotu*“ vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených v zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

25. 5. 2018

.....
Tomáš Kandra

Pod'akovanie

Ďakujem doc. Ing. Jiřimu Krejsovi, Ph.D., Ing. Janu Meindlovi a celému tímu Bender Robotics za podporu, profesionálny prístup a cenné rady pri spracovaní tejto bakalárskej práce.

Veľká vďaka patrí mojej rodine a priateľom za podporu a trpezlivosť.

Obsah

1	Úvod	12
2	Analýza problematiky	13
2.1	Charakteristika platformy BREACH	13
2.2	Topológia napájacieho systému	14
2.3	Nežiaduce javy pri hot-swappingu	15
2.4	Redundancia systému	16
2.5	Oddelenie zdrojov	17
2.6	Prúdové zrkadlo	18
3	Dostupné riešenia	19
3.1	Priemyselné a hobby aplikácie	19
3.1.1	Redundantné moduly	19
3.1.2	Buffer moduly	20
3.1.3	Y-PWR	21
3.2	LTC4236	21
4	Praktická časť	23
4.1	Popis zapojenia LTC4236	23
4.2	Voľba vyhotovenia záložného zdroja	24
4.3	Návrh nabíjacieho obvodu	26
4.4	Návrh zapojenia	26
4.5	Realizácia	28
5	Testovanie sústavy	30
5.1	Kontrola správneho návrhu zapojenia	30
5.2	Kontrola funkčnosti zariadenia	32
5.3	Kontrola schopnosti dlhodobej prevádzky	32
6	Záver	33
	Zoznam použitých zdrojov	34
	Zoznam použitých skratiek a symbolov	36
	Zoznam obrázkov	37
	Príloha A	38
	Príloha B	39

1 Úvod

V systémoch s vysokou spoľahlivosťou vzniká požiadavka nezávislosti funkcionality sústavy na manipulácii s komponentmi, u ktorých je umožnená ich výmena. Splnenie týchto nárokov si vyžaduje ošetrovanie procesu manipulácie (odpájanie a pripájanie) s komponentmi počas prevádzky. Takýto spôsob výmeny je nazývaný *hot swapping*. V podobných súvislostiach sa vyskytuje aj pojem *hot plugging*, a to v prípade že vymieňaný model interaguje so vstavaným softvérom zariadenia [2]. Správne navrhnutý hot-swap systém umožňuje predchádzanie situáciám hraničného charakteru, ktoré môžu nastať pri manipulácii s plug-in modulmi počas prevádzky. Hraničné situácie zahŕňajú všetky nežiadúce zmeny elektrických veličín v čase, ktoré môžu narušiť fungovanie systému, v horšom prípade poškodiť citlivé komponenty sústavy.

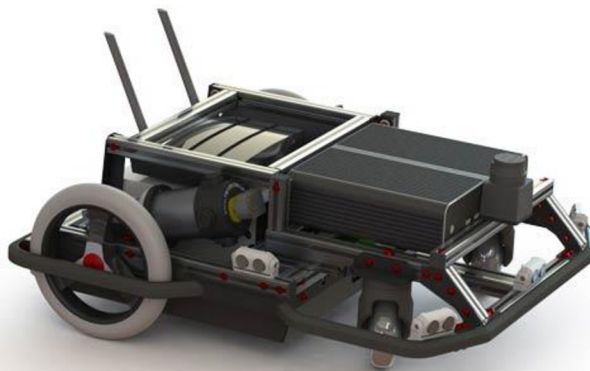
Hot-swap technológia nachádza využitie v aplikáciách, kde sa od systému požaduje dlhodobá nepretržitá prevádzka. Vymieňanými komponentami sú v tomto prípade moduly, ktoré po istom čase vyžadujú servisnú údržbu. Obvykle sa jedná o hard-disky, akumulátory, mikroprocesorové karty a iné.

V tejto práci sú zhrnuté dostupné riešenia a vytvorený konštrukčný návrh spoľahlivého napájacieho systému mobilného zariadenia, ktorý umožňuje hot-swap primárneho napájacieho zdroja. Toto zariadenie musí byť schopné na základe vstupných informácií rozhodnúť, či je bezpečné napájať záťaž z primárneho zdroja, alebo dať prioritu sekundárnemu zdroju a tak umožniť proces výmeny. Voľba medzi zdrojmi musí prebiehať bez časového oneskorenia kvôli zachovaniu prevádzky operačného systému mobilného zariadenia. Táto schopnosť maximalizuje prevádzkový čas robota a tým aj zvyšuje jeho efektívnosť a použiteľnosť pre nové typy aplikácií.

2 Analýza problematiky

2.1 Charakteristika platformy BREACH

Zariadenie, pre ktoré je v tejto práci navrhovaný redundantný napájací systém, je robustná modulárna robotická platforma BREACH s vysokou mobilitou, určená pre zaľudnené interiérové prostredia. Modulárny koncept ponúka veľkú prispôsobivosť a univerzálnosť. Zariadenie pracuje na embedded systéme typu ROS¹. Je vybavený laserovými a ultrazvukovými senzormi určenými na orientáciu v priestore a autonómny pohyb. [1]



Obr. 2.1: Modulárna robotická platforma BREACH [1]

Pohon mobilného robota je uskutočnený dvojicou elektromotorov, ktoré zároveň plnia funkciu pohonu a zmeny smeru jazdy. Pri menovitom napätí $U_N = 12\text{ V}$ boli stanovené nasledovné parametre, nevyhnutné pre ďalší postup návrhu. Počas prevádzky robota je menovitý zaťažovací prúd celej sústavy $I_{ZP} = 20\text{ A}$ s maximálnymi prúdovými špičkami $I_{ZP(PEAK)} = 30\text{ A}$. V momente, keď je robot pripravený v doku na výmenu batérie, je menovitý zaťažovací prúd $I_{ZD} = 10\text{ A}$ s napäťovými špičkami $I_{ZD(PEAK)} = 15\text{ A}$. Pokles prúdu je spôsobený odpojením pohonnej jednotky pri výmene batérie. Odber elektromotorov predstavuje väčšiu časť odberu celej sústavy. Informácie o veľkosti prúdov budú použité pri konštrukčnom návrhu dosky plošných spojov a pri voľbe záložného zdroja.

Primárny zdroj mobilného zariadenia je akumulátor zložený z článkov typu LiFePO_4 , ktorý má výstupné napätie $U_{IN1} = 12\text{ V}$ a kapacitu $Q_{IN1} = 720\text{ Wh}$. Konštrukčné vyhotovenie uloženia batérie umožňuje jej jednoduchú výmenu. Z dôvodu čo najvyššej efektivity celého zariadenia sa predpokladá, že akumulátor je vždy vymieňaný za iný, plne nabitý akumulátor. Počas prevádzky jedného akumulátora sa ten druhý nabíja a naopak. Rozhodujúcim činiteľom je čas t_{IN2} potrebný na výmenu primárneho zdroja. Tento čas je dôležitý ukazovateľ pretože určuje, ako dlho nie je možné zariadenie

¹ Robot Operating System.

plnohodnotne používať a ako dlho je záťaž napájaná zo záložného zdroja. Pri návrhu kontroléra je uvažovaná *ručná* výmena operátorom.

Z dôvodu zvýšenia spoľahlivosti zariadenia sa požaduje, aby bol operačný systém v prevádzke nezávisle na stave nabitia akumulátora. Odpadá tak riziko chyby spôsobenej nesprávnym nabootovaním systému, ktoré môže viesť k strate uložených údajov. Minimalizácia počtu vypnutí a zapnutí počítača tiež predlžuje jeho životnosť. Po krátkej analýze sa naskytá otázka, ako bude záťaž obsluhovaná od momentu odpojenia primárneho zdroja. Pri návrhu sa predpokladá, že robot sa nachádza na mieste, kde sa má výmena batérie vykonať.

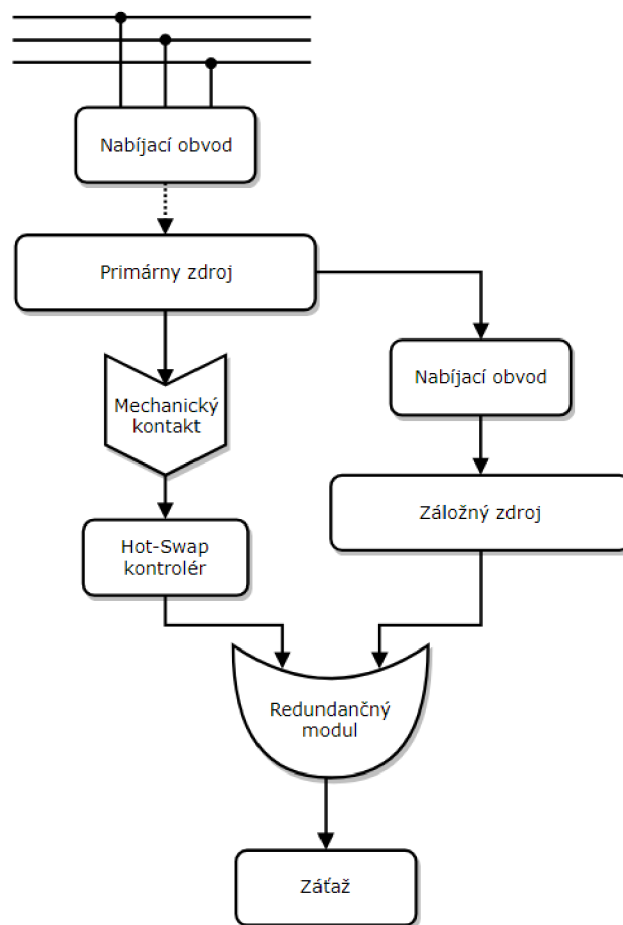
2.2 Topológia napájacieho systému

Počas výmeny primárneho zdroja sa mobilné zariadenie nachádza v doku. Výmenu ručne vykonáva operátor, ktorý vybitý akumulátor odpojí a pripojí nabitý. V čase, keď je batéria odpojená, je celý systém vypnutý a všetky dôležité dáta sa môžu stratiť. Tento spôsob výmeny batérie je nazývaný *cold swapping*. Počas odpojenia primárneho akumulátora musí jeho úlohu na určitý čas nahradiť záložný zdroj, ktorý môže byť všeobecne realizovaný dvoma spôsobmi.

Prvá možnosť je umiestnenie záložného zdroja mimo mobilné zariadenie, napríklad do nabíjacieho doku. Táto možnosť prináša malú úsporu hmotnosti mobilného zariadenia, ale návrh kontaktu zariadenia s dokom by bol neefektívny z dôvodu vysokého nároku na presnosť. Kontakt medzi dokom a robotom by tiež predstavoval ďalšie miesto potenciálneho vzniku porúch.

Druhým spôsobom je umiestnenie sekundárneho zdroja priamo na mobilné zariadenie. Záložný zdroj by bol nabíjaný počas normálneho fungovania zariadenia z primárneho akumulátora, počas jeho odpojenia by napájal záťaž spôsobenú prevádzkou operačného systému. Toto riešenie by si vyžadovalo iba akýsi *virtuálny* dok, ktorý by bol definovaný súradnicami polohy, kam sa robot presunie v prípade potreby výmeny batérie. Táto možnosť zvyšuje univerzálnosť systému a zjednodušuje celý návrh, preto je využitá v ďalších častiach návrhu.

Aby nebola stabilita prevádzky záťaže narušená, musí byť napájanie na výstupe kontroléra spojité. Navrhovaný kontrolér musí byť schopný vykonať prepnutie medzi zdrojmi bez časovej straty, inak by došlo k poškodeniu alebo vypnutiu citlivých komponentov na záťaži. Kontrolér tým pádom nemôže byť realizovaný pomocou súčiastok fungujúcich na princípe spínača s pohyblivými časťami, ako napr. relé. Vyplýva to z analýzy konštrukcie takýchto súčiastok, v ktorých voľbu uskutočňuje pohyblivý spínací kontakt. Čas potrebný na to, aby sa kontakt zopol by spôsobil, že by záťaž mohla ostať bez napájania, preto je táto možnosť nevhodná. Obr. 2.2 znázorňuje zjednodušenú topológiu napájacieho systému a vzájomné prepojenie jeho jednotlivých častí.



Obr. 2.2: Topológia napájacieho systému

2.3 Nežiadúce javy pri hot-swappingu

Jednoduchým modelom aplikácie, ktorá umožňuje objasnenie nežiadúcich javov vznikajúcich pri hot-swap výmene komponentov je základná doska napájajúca plug-in moduly reprezentujúce záťaž v zmysle spotrebičov energie. Moduly sú spojené mechanickými konektormi so základnou doskou.

Všetky komponenty aplikácie majú nezanedbateľnú vstupnú, resp. výstupnú kapacitu. Ku nej je potrebné pripočítať aj kapacitu konektorov obidvoch strán a kapacitu ciest na DPS. V súčte môže táto kapacita predstavovať desiatky až stovky μF [4]. Počas bežnej prevádzky, v ustálenom stave, sú kondenzátory plne nabité. V momente, keď dôjde k pripojeniu nového plug-in modulu sú jeho kondenzátory vybité. Vybitý kondenzátor sa prejavuje ako skrat, čo vedie k vzniku vysokého nabíjacieho prúdu. Ak nie je tento nárazový prúd regulovaný, môže dôjsť k poklesu svorkového napätia zdroja, čo má za následok nestabilitu celého systému. Nárazový prúd tiež poškodzuje mechanické konektory, cesty na DPS a znižuje trvanlivosť kondenzátorov. Navrhovaný modul musí byť schopný kontrolovať maximálny nárazový prúd v situáciách spojených s manipuláciou s plug-in modulmi. [13]

2.4 Redundancia systému

Redundancia je nevyhnutnou vlastnosťou spoľahlivého napájacieho systému. Tento pojem sa definuje ako duplikácia kritických komponentov v záujme zvýšenia spoľahlivosti systému [3]. Správne fungujúci redundantný systém napájania je schopný plnohodnotne a aspoň dočasne napájať záťaž osobitne z primárnej a sekundárnej batérie. Princíp spočíva v zapojení niekoľkých napájacích zdrojov paralelne, pričom každý z nich má obvykle určenú prioritu buď ako primárny, alebo ako záložný zdroj.

Príkladom redundancie môže byť paralelné zapojenie primárneho zdroja s identickým záložným zdrojom. Každý zo zdrojov je schopný napájať záťaž maximálnym prúdom $I_{MAX} = 5 \text{ A}$. Redundancia platí v tomto systéme iba vtedy, ak je maximálny odber záťaže $I_Z \leq 5 \text{ A}$. Ak by bol prúd vyšší, systém by síce bol schopný túto záťaž napájať², ale nebol by redundantný. Po odpojení jednej z batérií by nastala situácia, že zaťažovací prúd by bol väčší ako prúd ktorý by bol akumulátor schopný dodať. V tomto momente by hrozilo poškodenie zdroja, prípadne porušenie normálnej prevádzky obsluhovanej záťaže. Je preto vhodné monitorovať zaťažovací prúd, a v prípade prekročenia kritickej hladiny predísť podobnej situácii. Rozlišujú sa rôzne úrovne redundantných systémov, dva popísané typy patria medzi najfrekvencovanejšie. Iné varianty redundancie sú derivátmi týchto úrovní [11]:

$N+1$ – Systém má N identických zdrojov napätia ktoré pracujú počas bežnej prevádzky všetky naraz. Jeden zdroj je v systéme navyše, plní úlohu iba vtedy ,ak nastane porucha na niektorom z N zdrojov

$2N$ – Každý zo zdrojov má pridelený samostatný záložný zdroj, tento typ sa označuje aj ako redundancia $1+1$

V tejto aplikácii sa uvažuje splnenie podmienky redundancie $2N$ a to v momente, keď pohonná jednotka nie je v prevádzke (stand-by režim). Skutočnosť, že navrhovaný záložný zdroj má umožniť redundanciu iba v stand-by režime umožňuje použitie záložného zdroja s menšou kapacitou. Pri návrhu je však potrebné vyriešiť ochranu záložného zdroja pred vysokým nárazovým prúdom. Ten môže vzniknúť pri poruche primárneho zdroja počas prevádzky zariadenia. Ak by bola prevádzková redundancia splnená, kontrolér by mohol aj v tomto stave začať napájať záťaž záložným zdrojom. Keďže redundancia počas prevádzky nebude platiť, kontrolér bude musieť situáciu riešiť vypnutím systému, aby nedošlo k poškodeniu oboch zdrojov. Problematike redundantných systémov sa venuje veľká pozornosť hlavne v oblasti dátových centier a serverov, kde je potrebné riešiť spoľahlivosť veľkého celku tvoreného napájacími zdrojmi. Pre podrobnejšie informácie o tejto problematike viď [3].

² Platí iba v prípade že zdroje môžu pracovať súčasne

2.5 Oddelenie zdrojov

Pri paralelnom spojení dvoch elektrických zdrojov platí, že sa zvyšuje maximálny možný vybíjací prúd, výstupné svorkové napätie ostáva rovnaké ako napätie jedného z článkov. Aby toto tvrdenie platilo, musia mať zdroje identické výstupné napätie. V prípade že sa spájajú dva zdroje energie, je potrebné myslieť na nežiadúce elektrické javy spôsobené ich spojením a manipuláciou. V systéme dvoch a viac paralelne spojených zdrojov ktoré nemajú rovnaké svorkové napätia dochádza k parazitickým javom. Znamená to, že akumulátory majú snahu ustáliť svoje svorkové napätia na jednej spoločnej hodnote. Použitím Ohmovho zákona možno overiť, že veľkosť prúdu tečúceho z jednej batérie do druhej môže byť v desiatkach až stovkách A. Tento jav môže spôsobiť poškodenie či už na samotných akumulátoroch, vodičoch alebo na elektronike zariadenia. Preto musia byť zdroje tzv. úplne oddelené, čo pri obyčajnom paralelnom spojení neplatí.

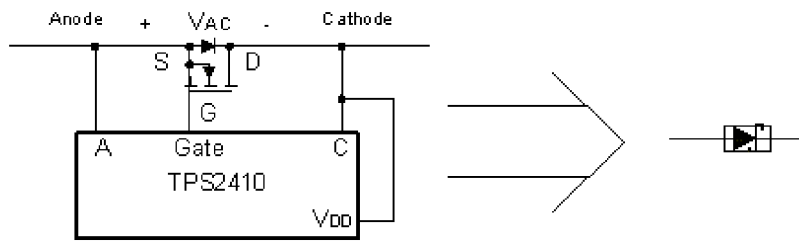
Spätný prúd je nebezpečným fenoménom nie len pri spájaní akumulátorov, ale aj pri odpájaní zdroja od záťaže. V prípade, že je záťaž kapacitného charakteru, môže nastať situácia kedy je napätie na výstupe vyššie ako na vstupe, čo dočasne spôsobí opačný smer prúdu v obvode [15]. Pri návrhu hot swap systému je potrebné umiestniť medzi zdroje a záťaž taký modul, ktorý je schopný úplne oddeliť dva zdroje a tiež predchádzať vzniku spätného prúdu.

Najjednoduchším spôsobom oddelenia zdrojov je logické hradlo OR, označované aj ako *Diode-OR*. Je vytvorené pripojením diódy sériovo ku každému paralelne zapojenému zdroju. Diódy zabráňujú spätným prúdom do batérií, v tomto zapojení môžu zdroje pracovať spoločne alebo s jedným zdrojom v stand-by režime. Nevýhodou tohto zapojenia je pokles napätia na dióde, nezanedbateľný v nízkonapäťových aplikáciách, a výkonová strata s ktorou je spojené prehrievanie obvodu.

V nízkonapäťových aplikáciách sa z dôvodu redukcie poklesu napätia na diódach používa technológia *FET-ORing*. Je realizovaná sériovým pripojením MOSFET tranzistora ku každému z paralelne spojených zdrojov. MOSFET je druh tranzistora riadený poľom, ktorého hradlo realizované vrstvou kovu je oddelené od polovodiča dielektrickou vrstvou oxidu daného polovodiča. Tieto tranzistory sú základným aktívnym prvkom dnešnej elektroniky.

Táto technológia umožňuje simulovať tzv. ideálnu diódu [7], to znamená diódu na ktorej nevzniká výrazný pokles napätia. Na ovládanie MOSFET-ov je potrebný kontrolér monitorujúci napätie U_{SD} medzi kontaktmi SOURCE a DRAIN. Kontrolér si možno zjednodušene predstaviť ako komparátor, ktorý porovnáva U_{SD} s referenčnou hodnotou $U_{SD(REF)}$, reprezentujúcu prítomnosť vhodného napájacieho zdroja. Na Obr. 2.4 je znázornená schéma MOSFET-u s kanálom typu N a kontroléra TPS2410. V niektorých literatúrach je táto schéma nahradená schematickou značkou podľa obrázku. Použitá metóda a rýchlosť kontroly U_{SD} určujú schopnosť kontroléra simulovať diódu. Výhodou je minimálny pokles výstupného napätia oproti vstupnému, je však potrebné zvoliť vhodný typ tranzistora s malým odporom $R_{DS(ON)}$. Tento odpor určuje stratový výkon MOSFET-u P_M v zapnutom stave. Jeho hodnotu možno vypočítať pomocou (1).

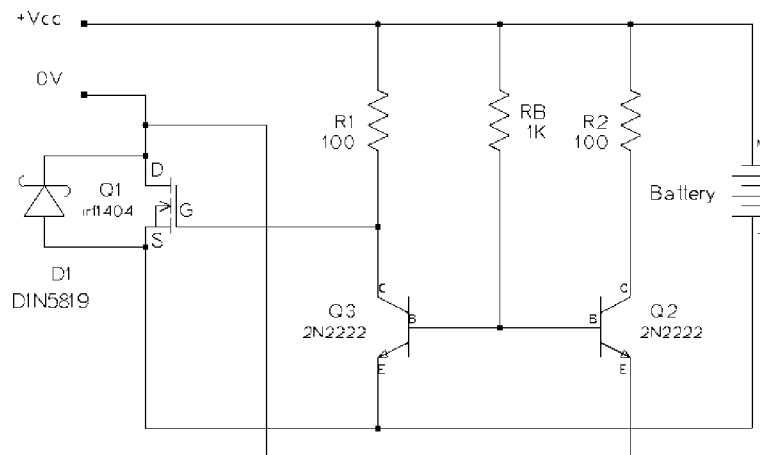
$$P_M = R_{DS(ON)} \cdot I_Z^2 \quad (1)$$



Obr. 2.3: MOSFET s kontrolérom TPS2410, schematická značka [13]

2.6 Prúdové zrkadlo

Jeden z možných a používaných princípov fungovania kontroléra slúžiaceho pre ochranu pred spätným prúdom je prúdové zrkadlo. Toto zapojenie môže mať rôzne podoby, v princípe je to obvykle dvojica bipolárnych tranzistorov s prepojenými bázami a dva rezistory, ktoré umožňujú zapnutie daných tranzistorov. Jeden z variantov zapojenia je na obr. 2.4. Vpravo je znázornený akumulátor ktorého póly vedú na svorky +VCC a 0V. Zmyslom zapojenia je, aby prúd nemohol v žiadnom prípade tiecť v opačnom smere (do akumulátora). Tranzistory Q2 a Q3 sú typu NPN, Q1 je MOSFET s kanálom typu N. Napätie U_{SD} je privedené na emitory Q2 a Q3 podľa obrázku.



Obr. 2.4: Prúdové zrkadlo [7]

V prípade, že je na Q1 kladné napätie U_{SD} , emitor Q2 má oproti zemi vyšší potenciál, čo spôsobí že Q2 sa vypne a Q3 sa zapne. Kolektor Q3 sa vďaka tomu uzemní čo spôsobí vypnutie MOSFET-u Q1. Záporné napätie spôsobí, že Q2 ostane zapnutý a Q3 sa začne vypínať. Tým sa začne zapínať Q1, napätie U_{GATE} sa ustáli tesne nad zapínacím napätím MOSFET-u. Toto zapojenie sa často používa napr. v nabíjačkách akumulátorov, v prípade že napätie na nabíjacom zdroji môže klesnúť pod napätie nabíjaného zdroja. V tom prípade by mohol vzniknutý opačný prúd poškodiť oba zdroje. Ďalšie varianty, správny spôsob návrhu zapojenia a konštrukčného vyhotovenia prúdového zrkadla je kvalitne spracovaný v [7], [8].

3 Dostupné riešenia

3.1 Priemyselné a hobby aplikácie

V tejto časti sú zhrnuté dostupné varianty zariadení ktoré umožňujú hot-swap. Nižšie menované riešenia fungujú na princípoch popísaných v predchádzajúcej kapitole. Jedná sa o moduly používané pri zálohovaní jednosmerného napájania.

3.1.1 Redundantné moduly

Redundantné moduly sa primárne využívajú v priemyselných aplikáciách, ktoré vyžadujú vysokú spoľahlivosť napájania. V momente, keď dôjde k poklesu napätia na jednom zo zdrojov, modul automaticky prepína záťaž na druhý zdroj. Tieto moduly sú tiež odolné voči poruchám, skratom a výpadkom prúdu prakticky vo všetkých častiach obvodu [11]. Presne táto vlastnosť vyhovuje požiadavkám mobilného zariadenia, pretože náhlým výpadkom prúdu možno nazvať aj odpojenie jedného zo zdrojov. Pri použití redundantného modulu je potrebné umiestniť ho priamo medzi primárny zdroj a záťaž, preto musí byť tento modul umiestnený na mobilné zariadenie. Jeden z výrobcov tohto typu modulov je Phoenix Contact. Na výber je niekoľko typov vyhotovení, ktoré možno medzi sebou porovnať. Výrobca udáva že všetky kategórie sú založené na použití MOSFET tranzistorov namiesto štandardných polovodičových komponentov.

Modul QUINT ORING je so svojimi funkciami najkomplexnejším riešením. Je schopný odolať poruche v elektrickej sieti, skratom a zlomom vodičov v prakticky všetkých častiach systému. Modul poskytuje signalizáciu stavu redundancie a funkciu ACB³, kedy modul využíva napájacie zdroje tak, aby každý z nich napájal iba 50% záťaže. To predlžuje život daných zdrojov, no v aplikácií kde primárny zdroj dobíja záložný je táto funkcia nepoužiteľná.



Obr. 3.1: Modul QUINT ORING [11]

³ Auto Current Balancing.

3.1.2 Buffer moduly

Tieto moduly pracujú na princípe zálohovania energie v kondenzátoroch s vysokou kapacitou. V momente, keď sa primárny akumulátor odpojí, energia uložená v kondenzátoroch zabezpečuje napájanie záťaže. Týmto riešením sa minimalizuje počet mechanických kontaktov v systéme, čím sa zvyšuje spoľahlivosť návrhu. Výrobcom udávaná životnosť kondenzátorov je v radoch desiatok rokov, tieto moduly sú prakticky bez údržbové. Nevýhodou je, že napájanie záťaže z kondenzátorov je značne časovo obmedzené. Čas zálohy t_z , počas ktorého zostane záťaž napájaná z modulu možno vypočítať rovnicou (2),

$$t_z = \frac{E_C}{U_{IN1} \cdot I_Z} \quad (2)$$

kde E_C je energia uložená v kondenzátoroch. Ako príklad možno uviesť Buffer modul C-TEC 1203 od výrobcu Schneider, ktorý má energiu v kondenzátoroch $E_C = 10 \text{ kJ}$. V prípade, že napätie zdroja je $U_{IN1} = 12 \text{ V}$ a zaťažovací prúd je $I_Z = 10 \text{ A}$, čas na výmenu primárneho akumulátora je $t_z = 83,3 \text{ s}$ [19].

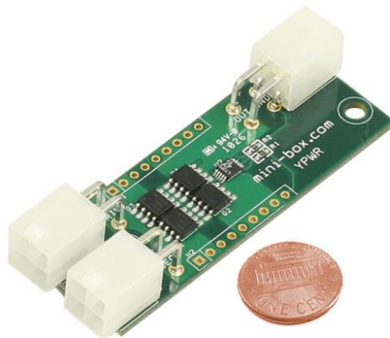
Nevýhodou týchto modulov je potreba umiestniť ich na mobilného robota, pričom ich hmotnosť je dvojnásobná oproti redundantným modulom. Najmenšie moduly majú hmotnosť 600g. Napätový pokles výstupného napätia oproti vstupu je 0,25 V, väčšina variant je navrhnutá pre 24 V systémy. Kondenzátory s veľkou kapacitou tiež predstavujú riziko, pretože pri poruche môžu byť plne nabité a spôsobiť poškodenie ostatných komponentov zariadenia.



Obr. 3.2: Modul C-TEC 1203 [17]

3.1.3 Y-PWR

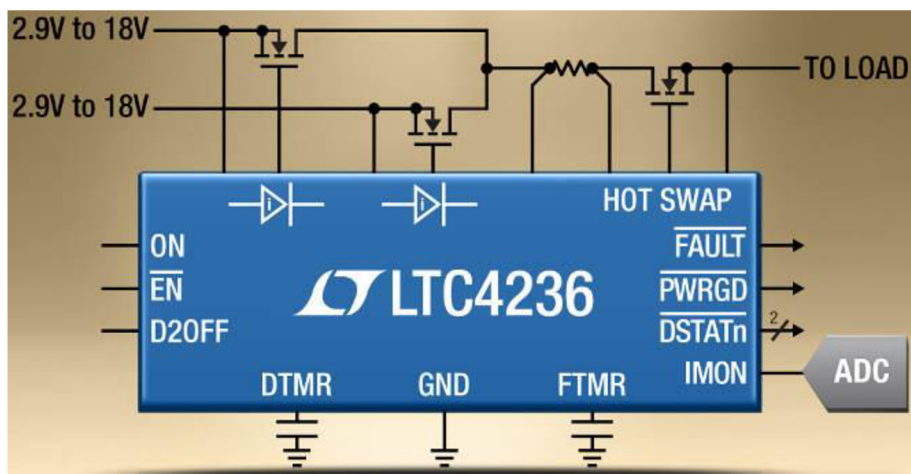
Toto zariadenie využíva technológiu FET-ORing spoločne s možnosťou hot-swapu jednotlivých zdrojov. Výrobca udáva maximálny kontinuálny zaťažovací prúd 20 A, maximálne napätie jedného z napájacích zdrojov 30 V. Výhodou tohto zariadenia je jeho minimalistické vyhotovenie a možnosť odpojenia jednotlivých zdrojov digitálnymi vstupmi. Nevýhodou je, že v prípade rovnosti svorkových napätí jednotlivých zdrojov dochádza k využitiu oboch zdrojov súčasne pri napájaní záťaže [19]. V technickom liste tohto zariadenia nie sú jednoznačne definované prahové hodnoty ako napríklad napätie pri ktorom dochádza k prepnutiu primárneho zdroja na záložný zdroj. Je možné že tieto prahové hodnoty nebudú tejto aplikácii vyhovovať. Limit zaťažovacieho prúdu je obmedzovacím činiteľom v prípadných nastavbách, očakávaných pri modularite platformy BREACH.



Obr. 3.3: Y-PWR [18]

3.2 LTC4236

LTC4236 je integrovaný obvod od výrobcu Linear Technology. Ovláda sústavu MOSFET tranzistorov zapojených tak, aby pracovali ako hradlo OR. Zároveň poskytuje ochranu pred vysokým nárazovým prúdom. Na výber sú dva základné druhy zapojenia. Prvé uprednostňuje ten z dvojice napájacích zdrojov, na ktorom je v danom okamihu namerané vyššie napätie. Druhá možnosť udeľuje prioritu jednému zo zdrojov vždy, keď je pripojený alebo sa práve pripojí, podmienkou je minimálna hodnota napätia zdroja $V_{IN(ON)}$. Obe zapojenia poskytujú ochranu pred popisovanými nežiadúcimi javmi pri hot-swape. Tento kontrolér nie je potrebné programovať, všetky prahové hodnoty sú nastaviteľné vhodnou kombináciou rezistorov a kondenzátorov podľa technickej dokumentácie. Zapojenie je vhodné z dôvodu možnosti prispôsobenia jeho rozmerov a optimalizácie funkcionality pre konkrétnu aplikáciu. Digitálne vstupy a výstupy umožňujú externé ovládanie celého zapojenia a možnosť štatistického vyhodnocovania spoľahlivosti systému [9].



Obr. 3.4: Základné zapojenie LTC4236 [9]

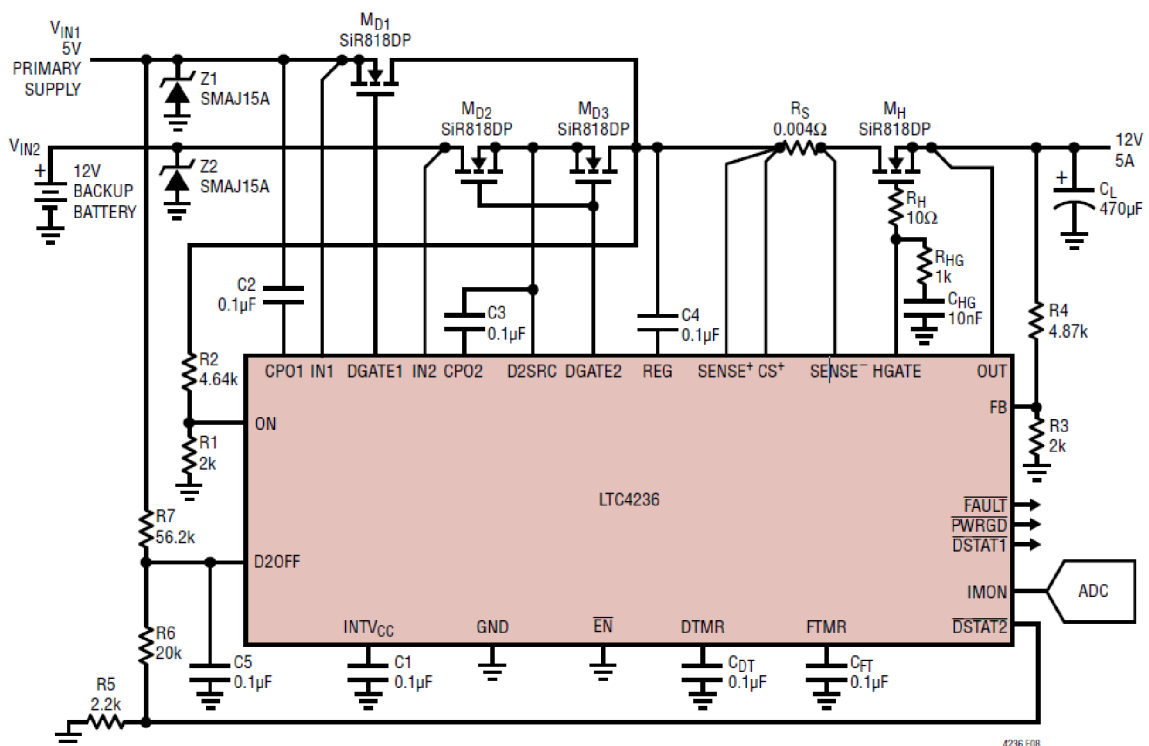
Výhodou spomenutých redundantných a buffer modulov je ich robustná konštrukcia, odolnosť voči vibráciám, jednoduchá montáž na DIN lištu, možnosť využitia vo výbušnom a prašnom prostredí a tepelná odolnosť. Všetky majú však spoločnú nevýhodu, ktorou je nezanedbateľný pokles výstupného napätia voči vstupnému. Tento pokles môže spôsobiť výrazné skrátenie doby, počas ktorej je akumulátor schopný danú záťaž obsluhovať. Je zrejmé, že tieto zariadenia sú určené primárne pre použitie v statických aplikáciách, napájaných priamo zo siete.

Návrh schémy zapojenia a výroba DPS s použitím integrovaného obvodu LTC4236 umožňuje vysporiadať sa so všetkými nedostatkami, ktoré by spôsobilo použitie hotového modulu. Takto vytvorený modul bude poskytovať prioritnú voľbu napájacieho zdroja, čo nebolo u hotových modulov jednoznačne definované. Tento fakt bol rozhodujúcim činiteľom, preto je v ďalšom postupe použitý tento variant vyhotovenia.

4 Praktická časť

V tejto časti je zhrnutý proces výroby hot-swap kontroléra chronologicky od návrhu jednotlivých parametrov až po výrobu DPS. K primárnemu zdroju (ďalej iba IN1) je zvolený vhodný záložný zdroj (ďalej iba IN2), s návrhom nabíjacieho obvodu. Pre objasnenie funkčných celkov použitého zapojenia je potrebné pochopiť funkciu všetkých použitých vstupov a výstupov integrovaného obvodu, ich popis je v podkapitole 4.4.

4.1 Popis zapojenia LTC4236



Obr. 4.1: 2-kanálový Hot-Swap kontrolér LTC4236 [9]

Na obr. 4.1 je znázornená schéma 2-kanálového redundantného kontroléra umožňujúceho hot-swap jedného z akumulátorov. Táto konkrétna schéma zapojenia ako aj rovnice použité pri návrhu sú čerpané z [9]. Súčiastky okolo kontroléra sú v podkapitole 4.5 prispôbolené tak, aby zapojenie spĺňalo stanovené požiadavky systému.

Na vstupe sa nachádzajú dva napájacie zdroje zapojené tak, že zdroj na kanáli V_{IN1} je hlavným napájacím zdrojom, ktorý bude pripojený na záťaž vždy keď bude prítomný na mobilnom zariadení. Na vstup V_{IN2} je pripojený záložný zdroj.

Na vstupe kanálu IN1 je do pinu D2OFF pripojený odporový delič zložený z rezistorov R6 a R7. Slúži k potlačeniu zapnutia tranzistorov na trase IN2, pretože DGATE2 spína tranzistory MD2 a MD3 iba v prípade, ak je D2OFF v stave logickej nuly. Týmto spôsobom sa v zapojení udeľuje priorita primárnemu napájacíemu zdroju. Ďalšou časťou je paralelné zapojenie tranzistoru MD1 k dvojici tranzistorov MD2 a MD3 zapojených spôsobom back-to-back⁴. Tento celok plní funkciu *FET-ORing*. Výstup z logického hradla vedie cez rezistor R_S. Napätie na tomto rezistore je privedené cez vstupy SENSE+ a SENSE- do kontroléra, ktorý aktívne porovnáva zaťažovací prúd s referenčnou hodnotou. Ak je veľkosť napätia na rezistore vyššia ako prahová hodnota, zapne sa časovač t_{FT} a po jeho uplynutí kontrolér vypína MH, čím odpája celú záťaž od napájania. Časovač je nastaviteľný voľbou kondenzátora C_{FT} na výstupe FTMR.

Výkonový zosilňovač na výstupoch DGATE kontroluje pokles napätia ($V_{IN}-V_{SENSE+}$). V prípade skratu obvodom tečie veľký prúd opačným smerom, ktorý výkonový zosilňovač zaregistruje a vypne príslušný tranzistor MD. Vďaka použitiu tejto metódy je výrobcom udávaný reakčný čas potrebný na detekciu skratového prúdu v jednotkách μ s. Rýchlosť celej odozvy závisí na použitých súčiastkach.

Dôležitou súčasťou zapojenia je ochrana pred nízkym napätím. Táto funkcia je realizovaná pripojením odporového deliča R1, R2 medzi výstup z časti *FET-ORing* (napr. SENSE+) a uzemnenie GND. Výstup z deliča je pripojený na vstup ON, prahová hodnota napätia je stanovená výberom vhodných rezistorov. V prípade poklesu napätia na pine ON pod hodnotu 1,155 V je vypnutý tranzistor MH, po zvýšení napätia nad túto prahovú hodnotu sa MH znovu zapne, bez ošetrovania debouncingu. Ak napätie na pine ON klesne pod 0,6 V, debouncing sa po obnovení vykoná.

Podmienkou uvedenia hot swap kontroléra do prevádzky je logická jednotka na vstupe ON a logická nula na vstupe \overline{EN} . V prípade splnenia týchto podmienok spustí časovač t_D počas ktorého je ošetrený prípadný debouncing spôsobený pripájaním napájacieho zdroja cez mechanický kontakt. Časovač t_D je nastaviteľný voľbou kondenzátora C_{DT} na výstupe DTMR. Po uplynutí časovača kontrolér zapne tranzistor MH, čím sa umožní napájanie záťaže.

Zapojenie je doplnené signalizáciou, ktorá pozostáva z troch LED diód. Prvá dióda je pripojená na výstup $\overline{DSTAT1}$, svieti v momente keď primárny zdroj napája záťaž. Druhá dióda na výstupe \overline{PWRGD} signalizuje napájanie záťaže zdrojom s vhodným svorkovým napätím, pričom nezáleží ktorý z dvojice práve záťaž napája. Tretia LED signalizuje stav po uplynutí časovača t_{FT} , čiže chybu spôsobenú vysokým zaťažovacím prúdom. Výstup tejto funkcie je označený \overline{FAULT} .

4.2 Voľba vyhotovenia záložného zdroja

Medzi hlavné kritériá pri voľbe vyhotovenia záložného zdroja patrí jeho kapacita, maximálne povolené kontinuálne zaťaženie, menovitý nabíjací prúd a v neposlednom rade aj rozmery. Predpokladané umiestnenie záložného zdroja je na DPS spoločne so zvyšnou elektronikou, tento fakt sa tiež premietol do rozhodnutia. Ako najvhodnejšie konštrukčné riešenie sa ukázalo použitie niekoľkých akumulátorov valcového typu spojených sériovo.

⁴ Zapojenie back-to-back umožňuje blokovanie prúdu v oboch smeroch v momente vypnutia oboch MOSFET-ov [14].

Kapacita záložného zdroja Q_{IN2} závisí na čase t_{IN2} , počas ktorého má byť schopný napájať záťaž. Inými slovami je to maximálny požadovaný čas na úplnú výmenu primárneho akumulátora. Druhým faktorom ovplyvňujúcim kapacitu je stredná hodnota zaťažovacieho prúdu I_Z . Vzťah na určenie požadovanej kapacity zdroja je nasledovný:

$$Q_{IN2} = t_{IN2} \cdot I_Z \quad (3)$$

Maximálny požadovaný čas na výmenu primárneho akumulátora bol stanovený na približne $t_{IN2} = 300$ s. Tento čas je predimenzovaný z toho dôvodu, aby sa batérie nevybíjali pod istú minimálnu úroveň. V opačnom prípade by došlo k skráteniu prevádzkyschopnosti z dlhodobého hľadiska. V čase, keď bude prebiehať výmena sa počíta so zaťažovacím prúdom $I_Z = 10$ A. Výsledná kapacita je $Q_{IN2} = 3000$ mAh. Na výber sú dva druhy akumulátorov, typ Li-Ion alebo LiFePO₄.

Li-Ion je druh nabíjateľnej batérie bežne používanej v spotrebnej elektronike. Kvôli vysokej hustote energie vzhľadom k objemu je vhodná pre prenosné zariadenia. Tento typ článku nie je potrebné tzv. formovať, to znamená niekoľko krát úplne nabíjať a vybíjať pred prvým použitím. Menovité napätie plne nabitého Li-Ion článku je stanovené normou na 4,2 V. Udávaná životnosť je obvykle 500-1200 nabíjacích cyklov. Pri rovnakom objeme článku má technológia Li-Ion obvykle vyššiu kapacitu oproti druhej kategórii.

LiFePO₄ je druh lithium-iónového akumulátora s mierne odlišnými vlastnosťami. Menovité napätie tohto typu článku je nižšie, sú dlhodobo odolnejšie a znesú väčší prúd. Nevýhodou je nižšia hustota energie oproti prvej kategórii. Pri hľadaní riešenia nabíjacieho obvodu k daným akumulátorom sa dospelo k záveru, že LiFePO₄ má obmedzený výber nabíjacích obvodov, tie dostupné boli obvykle zložité, s použitím veľkého množstva súčiastok alebo neposkytovali dostatočný nabíjací prúd. Nízka kapacita článku by si vyžadovala sériové spojenie niekoľkých paralelných batérii, čo nedovoľuje obmedzený montážny priestor. Po analýze niekoľkých možných riešení bolo zvolené sériové zapojenie štyroch Li-Ion článkov, konkrétne NCR18650PF. Výhodou tohto článku je jeho vysoký vybíjací prúd na pomery technológie Li-Ion. Kapacita jedného článku je približne identická s požadovanou kapacitou C_{IN2} . Pri sériovom spojení štyroch článkov bude menovité napätie batérie $U_{IN2} = 14,4$ V. Dôležité parametre z technického listu sú zhrnuté v tab. 4.1:

Kapacita	2900 mAh
Menovité napätie	3,6 V
Vybíjacie napätie (min.)	2,5 V
Kontinuálny vybíjací prúd (max.)	10 A
Nabíjacie napätie	(4,20 ± 0,03) V
Nabíjací prúd	1,35 A
Čas nabíjania	4 hod
Puzdro	18650
Rozmery (D, h)	(18,6 x 65,2) mm

Tab. 4.1: Parametre záložného zdroja

4.3 Návrh nabíjacieho obvodu

Dôležitým činiteľom pri návrhu systému záložnej batérie je navrhnuť všetky časové intervaly tak, aby bol systém schopný dlhodobej prevádzky. Nabíjací obvod musí byť schopný plne dobiť záložný zdroj počas normálnej prevádzky zariadenia, inak by po niekoľkých cykloch došlo k vybitiu záložného zdroja. Tejto problematike sa venuje kapitola 5.3. Na výber sú dve možnosti realizácie nabíjacieho obvodu. Každý z článkov môže byť nabíjaný osobitným nabíjacím obvodom alebo celú batériu možno nabíjať jedným nabíjacím obvodom.

V prípade nabíjania batérie ako celku je potrebné použiť balančný obvod (ďalej iba balancer). Pri výrobe akumulátorov dochádza k malým rozdielom v kapacite jednotlivých článkov a počas prevádzky strácajú akumulátory kapacitu z dôvodu teplotných zmien a iných faktorov. Pri nabíjaní batérie dosahuje plného napätia ten z článkov, ktorý má najnižšiu kapacitu. Tento fakt spôsobí, že sa zvyšné články na plné napätie nabiť nestihnú. Balancer slúži k aktívnemu vyrovnávaniu náboja v batérii, čo umožňuje využitie plnej kapacity zdroja a zvýšenie výdrže záložného zdroja [12]. Kombinácia balanceru s nabíjacím obvodom predstavuje zložitý systém s násobne väčším počtom súčiastok oproti variante nabíjania každého článku osobitne, preto sa z dôvodu zjednodušenia zapojenia k ďalšiemu postupu zvolil tento variant.

Ako nabíjací obvod bol použitý bq24013, jedná sa o jednoduchý čip určený pre akumulátory typu Li-Ion s nabíjacím prúdom do 1 A. Nabíjanie sa realizuje konštantným prúdom a následne konštantným napätím. Ukončenie nabíjania nastane pri poklese prúdu pod určitú hodnotu [10].

Pôvodný zámer použiť iba štvoricu nabíjacích čipov nebol nakoniec realizovateľný, zapojenie muselo byť doplnené o štyri DC/DC meniče slúžiace na galvanické oddelenie. Dospelo sa k záveru, že každý nabíjací obvod musí mať vlastnú hladinu minimálneho potenciálu, ktorý je zhodný s potenciálom kladného pólu susedného akumulátora (bližšieho k zemi nabíjacieho zdroja).

4.4 Návrh zapojenia

Táto časť slúži k návrhu parametrov zapojenia tak, aby vyhovovali konkrétnej aplikácii. Prvým krokom je stanovenie odporu rezistora R_S , ktorý je použitý k detekcii prekročenia maximálneho zaťažovacieho prúdu $I_{LOAD(MAX)} = 20$ A.

$$R_S = \frac{\Delta V_{SENSE(TH)(MIN)}}{I_{LOAD(MAX)}} \quad (4)$$

Veličina $\Delta V_{SENSE(TH)(MIN)}$ predstavuje prahovú hodnotu napätia na rezistore R_S . Po jej prekročení začne kontrolér vyhodnocovať možnosť prekročenia $I_{LOAD(MAX)}$ podľa kapitoly (4.2). Bol zvolený rezistor s odporom $R_S = 1$ m Ω , z dôvodu že rezistor s týmto odporom je bežne používanou súčiastkou na snímanie prúdu. Stanovenie maximálneho prúdu bolo orientačné, skutočnú hodnotu prúdu $I_{LOAD(MAX)}$ by bolo možné vypočítať spätným dosadením do rovnice (4). Nízka hodnota odporu rezistora sa používa k minimalizácii strát na rezistore. Vzhľadom na to, že rezistorom môže tiecť prúd

až 20 A, je potrebné navrhnuť vyhotovenie rezistora, ktoré bude dimenzované na výkon pri maximálnom odbere.

$$P_{RS(MAX)} = (I_{Z(MAX)})^2 * R_S \quad (5)$$

Rezistor s požadovanou hodnotou odporu je bežne dostupný v dvoch vyhotoveniach, s maximálnym výkonom do 0,4 W a do 1,5 W. Zvolená bola možnosť $P_{MAX} = 1,5$ W, týmto predimenzovaním sa zníži teplotná záťaž rezistora, ktorá by pri dlhodobej prevádzke mohla spôsobiť nepresnosť v meraní prúdu a následnú nespoľahlivosť.

Ďalšou časťou návrhu je delič R1, R2, ktorý je určený prahovou hodnotou napätia $V_{IN(UV)} = 9,0$ V. Pri tomto napätí napájacieho zdroja vykoná kontrolér ochranu pred nízkym napätím, tzn. odpojí záťaž vypnutím tranzistora MH.

$$R_1 = \left(\frac{V_{ON(TH)}}{I_{IN(LEAK)}} \right) * 0,2\% \quad (6)$$

$$R_2 = \left(\frac{V_{IN(UV)}}{V_{ON(TH)}} - 1 \right) * R_1 \quad (7)$$

Zvolené hodnoty odporu budú opäť štandardné, konkrétne $R_1 = 2k\Omega$ a $R_2 = 12k\Omega$. Delič R3, R4 určuje prítomnosť zdroja s vyhovujúcim napätím. Hodnota napätia $V_{OUT(PG)}$ bola stanovená na 10,5 V, odpor rezistoru R3 je stanovený v technickom liste na hodnotu $R_3 = 2k\Omega$.

$$R_4 = \left(\frac{V_{OUT(PG)}}{V_{FB(TH)}} - 1 \right) * R_3 \quad (8)$$

Delič R6, R7 privedený na vstup D2OFF udeľuje prioritu primárnemu zdroju vždy ak napätie na zdroji $V_{IN1(ON)} \geq 10,5$ V. Odpor rezistoru R6 je stanovený v technickom liste na hodnotu $R_6 = 20k\Omega$.

$$R_7 = \left(\frac{V_{IN1(ON)}}{V_{D2OFF(H,TH)}} - 1 \right) * R_6 \quad (9)$$

Pripojenie rezistora R5 a výstupu DSTAT2 na rezistor R6 spôsobí zvýšenie hysterézie na vstupe D2OFF z 20 mV na 100 mV. To spôsobí že voľba záložného zdroja nastane pri v prípade poklesu napätia zdroja na kanáli IN1 pod $V_{IN1(OFF)}$.

$$V_{IN1(OFF)} = V_{D2OFF(L,TH)} * \left(\frac{R_7}{R_6} + 1 \right) \quad (10)$$

Kondenzátory v zapojení boli volené s ohľadom na odporúčania v technickom liste, navyše bol doplnený výstupný keramický kondenzátor C6, ktorý v kombinácii s C7 dokáže filtrovať šum v širšom pásme.

Pri výbere vhodných MOSFET-ov je dôležitou vlastnosťou odpor zapnutého tranzistora $R_{DS(ON)}$ a maximálne DRAIN-SOURCE napätie U_{DS} [15]. Vhodné vlastnosti poskytujúe

SiR158DP. Na výber sú tri typy puzdra, bol zvolený typ POWER-PAK SO-8 z dôvodu lepšieho odvodu tepla oproti štandardnému puzdru SO-8. Výkon na tranzistore je počítaný pre maximálnu záťaž a hodnotu odporu $R_{DS(ON)MAX} = 0,0023 \Omega$, čo je podľa technického listu maximálna hodnota odporu v zapnutom stave.

$$P_{M(MAX)} = (I_{Z(MAX)})^2 \cdot R_{DS(ON)MAX} \quad (11)$$

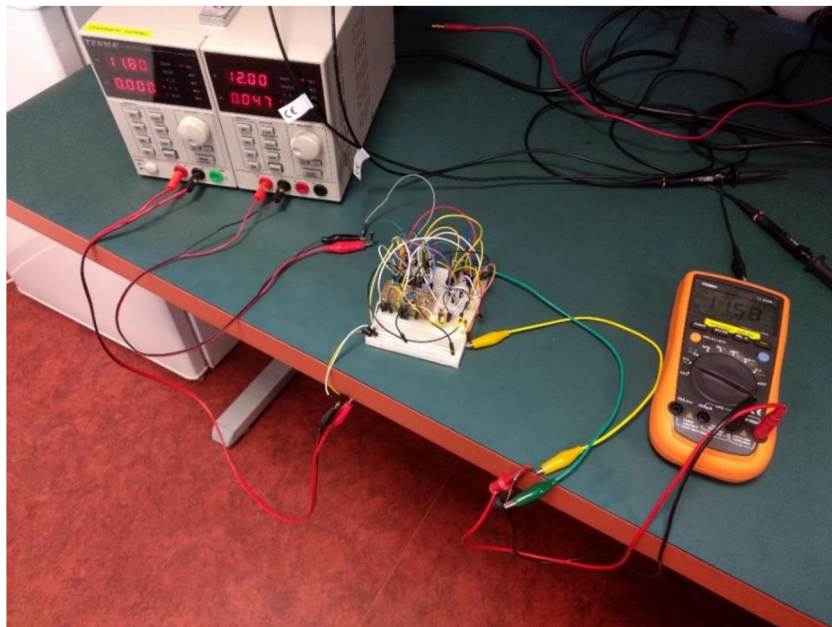
Stratový výkon na tranzistore je približne 0,92 W. Súčin výkonu a tepelného odporu R_{thJA} udáva oteplenie tranzistoru oproti bežnej okolitej teplote $t_{AMBIENT} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ [15].

$$\Delta t_{M(MAX)} = R_{thJA} \cdot P_{M(MAX)} \quad (12)$$

Teoretická hodnota teploty tranzistoru pri maximálnom kontinuálnom odbere je približne $52 \text{ }^\circ\text{C}$, čo vyhovuje jeho konštrukčným vlastnostiam. Tento tranzistor je teda vhodné použiť.

4.5 Realizácia

Prvým krokom, ktorý nasledoval po návrhu prvkov zapojenia bola výroba prototypu. Tento prototyp mal overiť funkčnosť zapojenia hot-swap kontroléra, zatiaľ bez napájacieho systému záložného zdroja. Prototyp bol realizovaný na kontaktnom poli, k nemu bola vyrobená DPS *miniboard_v2* z prílohy, ktorá slúži ako päťica integrovaného obvodu LTC4236. Jedná sa o dvojvrstvovú dosku vyrobenú fotocestou. Testovanie prototypu bolo úspešné, zariadenie splňuje požiadavky návrhu.



Obr. 4.2: Testovanie prototypu

Po prototypy sa pokračovalo návrhom schémy nabíjacieho systému. Prebehla jeho integrácia do existujúcej schémy hot-swap kontroléra, bola vytvorená DPS *hotswap_charger_v1*, pri ktorej museli byť dodržané maximálne rozmery priestoru, do ktorého bude daná DPS umiestnená. Pri návrhu boli zohľadnené odporúčania z jednotlivých technických listov, týkajúce sa rozmiestnenia komponentov pre zaručenie maximálnej spoľahlivosti a funkcionality. Táto DPS bola vyrobená a otestovaná. Pri testovaní sa zistila chyba pri návrhu nabíjacieho systému, ktorá bola opravená v novej verzii DPS *hotswap_charger_v2*, spoločne s ďalšími menšími úpravami.



Obr. 4.3: Skompletizovaná DPS *hotswap_board_v1*

5 Testovanie sústavy

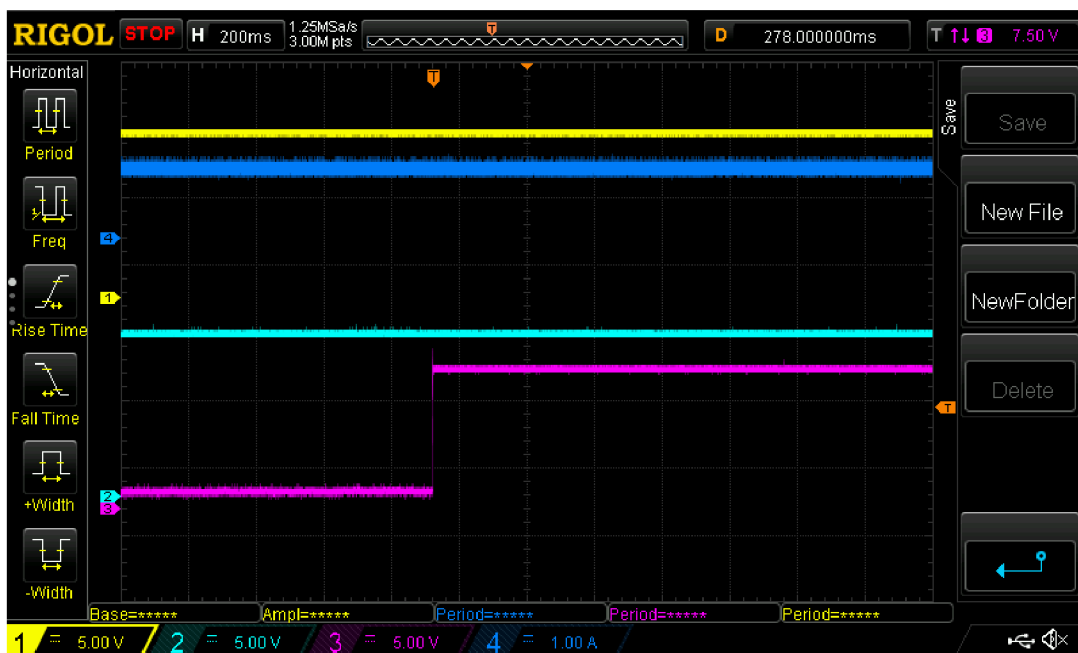
5.1 Kontrola správneho návrhu zapojenia

Po kompletizácii DPS bolo zariadenie pripojené na dvojicu laboratórnych zdrojov a osciloskop, boli namerané priebehy dôležitých veličín. Grafické výstupy na obr. 5.2, obr. 5.3 a obr. 5.4 znázorňujú nasledovné veličiny:

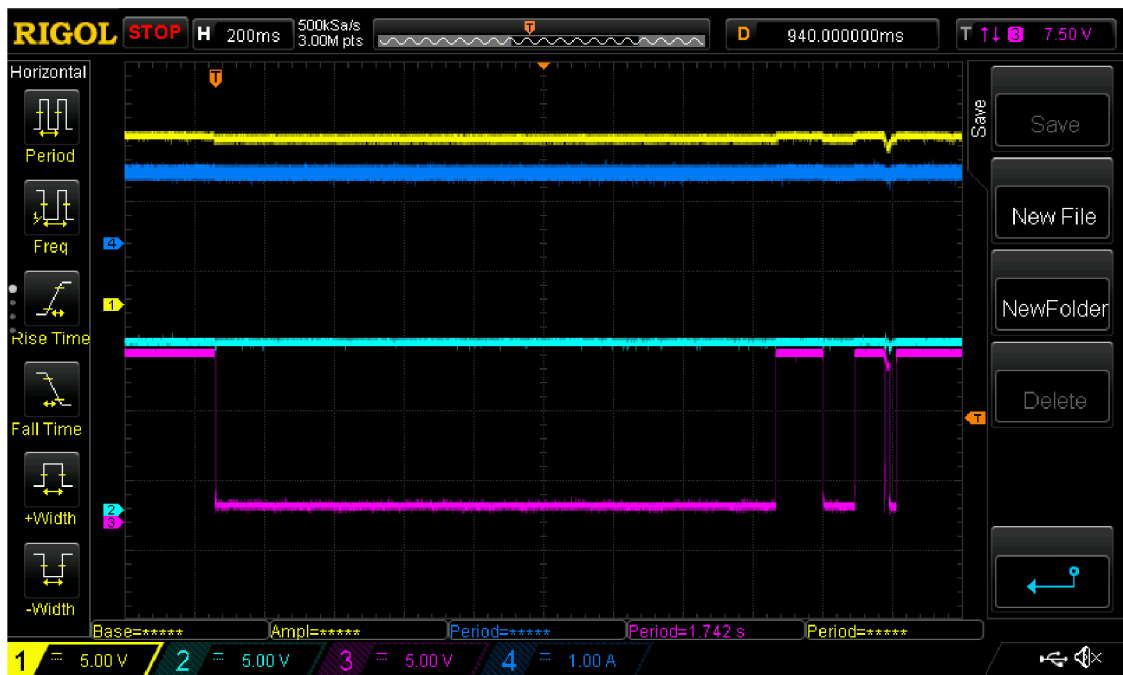
- Kanál 1 (Žltá) – Výstupné napätie U_{OUT}
- Kanál 2 (Sv. modrá) – Napätie záložného zdroja U_{IN2}
- Kanál 3 (Ružová) – Napätie primárneho zdroja U_{IN1}
- Kanál 4 (Tm. modrá) – Výstupný prúd I_{OUT}

Na začiatku priebehu z obr. 5.1 je odpojený IN1, záťaž je napájaná zdrojom IN2. Následne dôjde k pripojeniu zdroja IN1, jeho svorkové napätie však nevyhovuje požadovaným parametrom ($U_{IN1} < 11.5 \text{ V}$). Sústava podľa očakávaní reaguje bez zmeny napájacieho zdroja.

Obr. 5.2. ukazuje na začiatku stav v ktorom sú pripojené oba zdroje, $U_{IN1} = 12\text{V}$, $U_{IN2} = 11.8\text{V}$. Zťaž je napájaná z IN1. Následne dôjde k odpojeniu IN1, sústava sa prepne na IN2. Po určitom čase dôjde k opätovnému pripojeniu IN1, sústava automaticky udeľuje prioritu tomuto zdroju. Nestabilný priebeh U_{IN1} pri pripájaní je spôsobený dosadaním svoriek laboratórneho zdroja na kontakty DPS.. Je vidno že aj pri takejto situácii ostáva výstupné napätie bez výraznejších výchyliek, preto možno toto zapojenie považovať za funkčné.



Obr. 5.1: Pripojenie primárneho zdroja s nevhodným svorkovým napätím



Obr. 5.2: Simulácia manipulácie s primárnym zdrojom



Obr. 5.3: Detail pripojenia primárneho zdroja

5.2 Kontrola funkčnosti zariadenia

Tento súbor testov slúži k overeniu funkčnosti zapojenia hot-swap kontroléra a nabíjacieho obvodu. Je kladený dôraz na kontrolu správnosti nastavenia prahových hodnôt $V_{IN(UV)}$ a $V_{OUT(PG)}$. Jednotlivé úlohy kontrolujú jednoduché princípy fungovania, tento cyklus ale musí byť vykonaný kvôli zaručeniu spoľahlivosti zariadenia a predchádzanie následkom spôsobeným napr. zámenou súčiastok pri montáži DPS.

i	Stav sústavy	Požadovaná odozva
1	$U_{IN1} = U_{IN2}$	Udelenie priority IN1
2	$U_{IN1} < V_{IN(UV)}$	Udelenie priority IN2
3	Odpojenie IN1	Udelenie priority IN2
4	Pripojenie IN1, $U_{IN1} > V_{OUT(PG)}$	Udelenie priority IN1
5	$U_{IN2} < (U_{O(REG)} - 0.1) V$	Nabíjací obvod zahájí nový cyklus
6	$U_{IN2} > (U_{O(REG)} - 0.1) V$	Nabíjací obvod nedobíja IN2
7	$I_{O(OUT)} < I_{(TAPER)}$	Nabíjací obvod prestane dobíjať IN2
8	$I_Z > I_{LOAD(MAX)}$	Vypnutie MH

Tab. 5.1: Testovanie funkčnosti zariadenia

5.3 Kontrola schopnosti dlhodobej prevádzky

Keďže je v tejto práci navrhované zariadenie ktoré má zaručiť dlhodobú prevádzku mobilného zariadenia, navrhnutý záložný zdroj sa musí počas jedného cyklu vybiť iba na takú úroveň, aby bolo možné za bežný čas prevádzky akumulátor znovu plne dobíť.

Táto kontrola overí, či je navrhnuté zariadenie schopné absolvovať opakovanú výmenu primárneho zdroja bez toho, aby došlo k postupnému vybitiu záložného zdroja. Tento cyklus je časovo náročnejší a vyžaduje simuláciu reálnej záťaže.

Výstupom z testovania budú hodnoty svorkového napätia záložného zdroja U_{IN2} a čas potrebný na plné nabitie záložného zdroja t_{CHRG2} pri tomto napätí. Napätie U_{IN2} bude porovnané s prahovou hodnotou napätia záložného zdroja $V_{BAT(PRE)}$, pod ktorú sa batérie neodporúčajú vybíjať. Čas t_{CH2} nesmie prekročiť čas bežnej prevádzky mobilného zariadenia t_{STDOP} . Toto testovanie musí byť vykonané pre bežný čas výmeny IN1 ako aj pre maximálny čas výmeny IN1, správne fungujúce zariadenie musí vyhovovať podmienkam aj v hraničných situáciách.

6 Záver

Táto bakalárska práca bola výbornou skúsenosťou z hľadiska sklbenia teoretických poznatkov v oblasti elektrotechniky s realizáciou funkčného zariadenia. Hlavným cieľom bol návrh konštrukčného riešenia hot-swap kontroléra spĺňajúceho požiadavky mobilného robota BREACH. Po analýze dostupných riešení bol zvolený variant vyhotovenia s integrovaným obvodom LTC4236. Ako prvý bol vyrobený prototyp na kontaktovom poli, ktorý overil funkčnosť zapojenia a boli na ňom stanovené prahové hodnoty jednotlivých rozhodovacích úrovní. Následne bola navrhnutá prvá verzia DPS, ktorá je doplnená o záložný zdroj spoločne s nabíjacími obvody. Testovanie prvej verzie skončilo mechanickým poškodením jedného z integrovaných obvodov bq24013, z dôvodu chyby v návrhu systému nabíjania. Každý subsystém tvorený akumulátorom a nabíjacím obvodom bol v tejto verzii pripojený na spoločnú zem GND. Toto spôsobilo že na rezistoroch R_{SET} boli v každom z obvodov namerané iné rozdiely potenciálov, čo pravdepodobne spôsobilo vznik neočakávaných prúdových slučiek.

Druhá verzia je popísaná a priložená v tejto práci, pribudli v nej DC/DC meniče slúžiace na galvanické oddelenie jednotlivých nabíjacích obvodov. DPS je upravená tak, že každý z obvodov má vlastnú hladinu minimálneho potenciálu. Táto verzia sa dostala do štádia kompletizácie návrhu a výroby prototypu pre nabíjací systém.

Samostatný Hot-Swap kontrolér je plne funkčný a pripravený na dlhodobé testovanie a optimalizáciu. Grafické výstupy z osciloskopu potvrdili, že prepnutie medzi zdrojmi prebieha bez časovej straty, respektíve je táto strata tak malá, že ju nebolo možné namerať.

Integrácia jednotlivých subsystémov vytvorila sofistikované zariadenie, ktorého návrh sa nezaobišiel bez komplikácií. Vývoj zariadenia bude pokračovať, ďalšia optimalizácia zariadenia bude v podobe tvorby a plnenia striktnějších podmienok spomenutých v kapitole 5.2 Nevylučuje sa ani použitie iného vyhotovenia nabíjacieho obvodu, napríklad vrátane spomínaného balanceru. Pri testovaní bolo zistené, že v dôsledku pevného zabudovania záložného zdroja dochádza k stavu, že pri snahe o úplné vypnutie sa zariadenie dostáva do stavu napájania záťaže záložným zdrojom. Tejto situácii možno predísť pridaním externého vypínača záložného zdroja, no elegantnejším riešením je privedenie napätia na pin \overline{EN} , pomocou ktorého možno zariadenie vypnúť.

Zoznam použitých zdrojov

- [1] *BREACH mobile robotic platform*. [online]. 2016, [cit. 10-5-2018]. Dostupné z: <<http://www.benderrobotics.com/breach.html>>.
- [2] O'SULLIVAN, M. Understanding Hot Swap: Example of Hot-Swap Circuit Design Process. *Analog Dialogue*. [online]. 2008, Máj, [cit. 28-12-2017]. Dostupné z: <<http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/understanding-hot-swap.html>>.
- [3] ALLEN, M. Redundancy: N+1, N+2 vs. 2N+1 (Part II). *DATACENTERS* [online]. 16. 11. 2016 [cit. 7-3-2018]. Dostupné z: < <https://www.datacenters.com/news/redundancy-n1-n2-vs-2n-vs-2n1-part-ii> >.
- [4] ROGACHEV, A. *Handling System Transients in Hot Swap Applications*. [online]. 2015, Máj, [cit. 18-4-2018]. Dostupné z: <<http://www.ti.com/lit/an/slva703/slva703.pdf>>.
- [5] TRINITIS C., KARL W., LEBERECHE M. Electrical phenomena during Hot Swap events. [online]. *Proceedings. 2000 Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing*, Los Angeles, CA, 2000, pp. 19-26. doi: 10.1109/PRDC.2000.897280.
- [6] YUAN X., WU X., ZHAO M., YAN X. A Smart Hot Swap Controller IC design, *2005 IEEE Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits*, 2005, pp. 293-296. doi: 10.1109/EDSSC.2005.1635265.
- [7] SARKIES, K. "Ideal" Power Diode. [online]. 2010, 2. 1. 2018 [cit. 14-4-2018]. Dostupné z: < <https://jiggerjuice.info/electronics/projects/power/ideal-diode.html> >.
- [8] LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION. *LTC4358, 5A Ideal Diode Datasheet* [online]. 2007. [cit. 8-5-2018]. Dostupné z: < <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/4358fa.pdf> >.
- [9] LINEAR TECHNOLOGY CORPORATION. *LTC4236, Dual Ideal Diode-OR and Single Hot Swap Controller with Current Monitor Datasheet* [online]. 2015, [cit. 8-5-2018]. Dostupné z: < <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/4236f.pdf> >.
- [10] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. *bq24012, Single-Chip, Li-Ion Charge Management IC Datasheet* [online]. 2002, Január 2014 [cit. 10-5-2018]. Dostupné z: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq24013.pdf>>.

- [11] MOLDEHN, A. *Redundant power supply concepts*. [online]. 2015 [cit. 18-4-2018]. Dostupné z: < https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads_ed/global/web_dw1_specialist_essay/Redundancy_modules_en.pdf>.
- [12] DREW, J. Active Cell Balancer Extends Run Time and Lifetime of Large Series-Connected Battery Stacks. *Journal of Analog Innovation*. [online]. 2013, apríl [cit. 7-3-2018]. Dostupné z: < <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/lt-journal-article/LTJournal-V23N1-01-df-LTC3300-1-Drew.pdf>>.
- [13] KANDO, B. Redundant power techniques for servers explained. *EE Times* [online]. 5. 8. 2007 [cit. 7-3-2018]. Dostupné z: <https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1273185&page_number=2>.
- [14] STOKES, Z., KAKNEVICIUS, A. *Reverse Current Protection in Load Switches* [online]. 2016, máj [cit. 4-4-2018]. Dostupné z: <<http://www.ti.com/lit/an/slva730/slva730.pdf>>.
- [15] STEVENS, J. *Selecting Transistors for Hot-Swap Applications* [online]. 2009, december [cit. 2-1-2018] Dostupné z: <<http://www.ti.com/lit/an/slva379/slva379.pdf>>.
- [16] JUNG, E. *A FET OR-ing Circuit For Fault-Tolerant Power Systems* [online]. 2002, máj. Dostupné z: < <http://www.tij.co.jp/jp/lit/an/slva116/slva116.pdf> >.
- [17] J. SCHNEIDER ELEKTROTECHNIK GmbH., *Buffer module with supercapacitors*, [online]. 2012, [cit. 19-11-2017] Dostupné z: < https://www.j-schneider.de/fileadmin/user_upload/j-schneider.de/J._Schneider/pdf/Prospekte/C_TECe.pdf >.
- [18] ITUNER NETWORKS CORP., *Y-PWR* [online]. 2018, [cit 22-1-2018] Dostupné z: <<http://resources.mini-box.com/online/PWR-Y-PWR/PWR-Y-PWR-manual.pdf>>.
- [19] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2005. 128 s. ISBN 80-01-03351-1
- [20] BLUM, Jeremy. *Eagle Tutorial Series* [online]. 2012, jún. Dostupné z: <<https://www.jeremyblum.com/portfolio/eagle-tutorial-series/>>.

Zoznam použitých skratiek a symbolov

DPS	– Doska plošných spojov
FET	– Tranzistor ovládaný poľom (<i>Field-Effect Transistor</i>)
LED	– Luminiscenčná dióda (<i>Light-Emmiting Diode</i>)
MH	– MOSFET pre funkciu Hot-Swap
MD1, MD2	– MOSFET pre funkciu <i>FET-ORing</i>
DGATE	– Gate pre MOSFET tranzistory MD plniace funkciu FET-oring
D2OFF	– Kontrolný vstup. Po prekročení $V_{D2OFF(H,TH)}$ vypne MD na kanáli IN2.
DSTAT1	– Výstup signalizujúci napájanie záťaže z primárneho zdroja
DTMR	– Terminál na stanovenie časovača t_{DT}
EN	– Uzemnenie pinu je podmienka funkčnosti kontroléra
$\overline{\text{FAULT}}$	– Digitálny výstup signalizuje prekročenie I_{ZMAX}
FB	– Rozhodovacia úroveň pre $\overline{\text{PWRGD}}$
FTMR	– Terminál na stanovenie časovača t_{FT}
GND	– Uzemnenie zariadenia
HGATE	– Gate pre MOSFET tranzistor MH plniaci funkciu Hot-Swap
INTVCC	– Výstup interného zdroja 5 V ktorý napája zariadenie
ON	– Kontrolný vstup
$\overline{\text{PWRGD}}$	– Digitálny výstup stavu výstupného napätia
SENSE+	– Vstup s vyšším potenciálom na rezistore R_s
SENSE-	– Vstup s nižším potenciálom na rezistore R_s

Zoznam obrázkov

2.1: Modulárna robotická platforma BREACH [1]	13
2.2: Topológia napájacieho systému.....	15
2.3: MOSFET s kontrolérom TPS2410, schematická značka [13].....	18
2.4: Prúdové zrkadlo [7]	18
3.1: Modul QUINT ORING [11]	19
3.2: Modul C-TEC 1203 [17]	20
3.3: Y-PWR [18].....	21
3.4: Základné zapojenie LTC4236 [9].....	22
4.2-kanálový Hot-Swap kontrolér LTC4236 [9]	23
4.2: Testovanie prototypu	28
4.3: Skompletizovaná DPS hotswap_board_v1	29
5.1: Pripojenie primárneho zdroja s nevhodným svorkovým napätím	30
5.2: Simulácia manipulácie s primárnym zdrojom	31
5.3: Detail pripojenia primárneho zdroja	31

Príloha A

Obsah CD

Priložené CD obsahuje technické listy dôležitých komponentov, schémy zapojenia a návrhy DPS a elektronickú verziu bakalárskej práce v nasledujúcej adresárovej štruktúre:

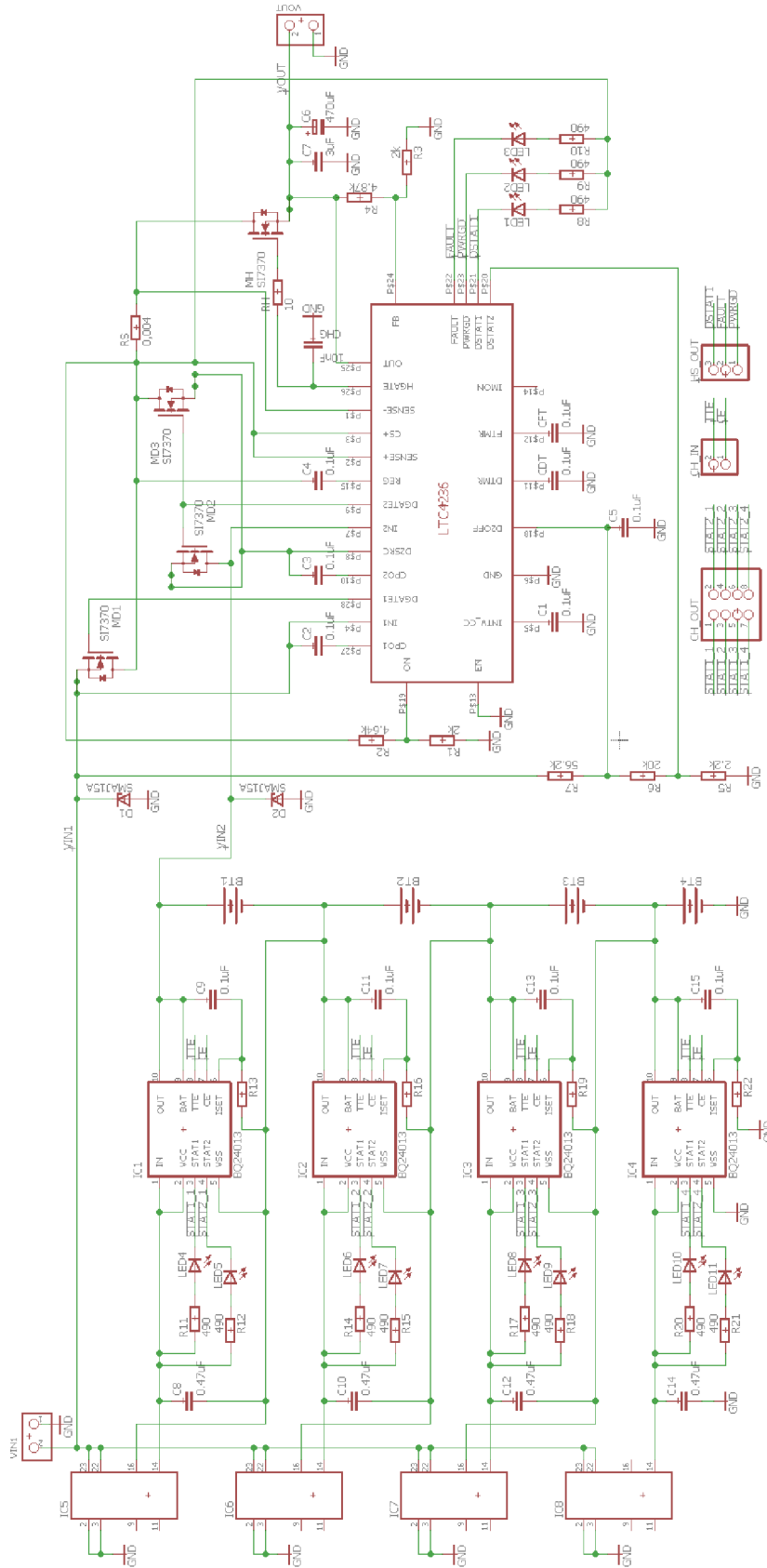
- */datasheets* – Technické listy
- */foto* – Fotodokumentácia
- */miniboard_v2* – Dokumentácia DPS použitej v prototype
- */hotswap_charge_v2* – Dokumentácia DPS s opravou nabíjajúcich obvodov

Príloha B

Zoznam súčiastok

Označenie	Hodnota	Puzdro	Počet	Typ
C1 – C5, C8, C10, C12, C14, Cdt, Cft	100 nF	0805	7	Keramický
C7, C9, C11, C13	470 nF	0805	4	Keramický
C6	2,2 uF	0805	1	Keramický
CL	470 uF	0805	1	Elektrolytický
CHG	10 nF	0805	1	Keramický
Rs	0,001 Ω	2512	1	Current Sense, 1,5 W
RH	10 Ω	0805	1	-
RHG	1 k	0805	1	-
R1, R5	2k2	0805	2	-
R3	2k			-
R2	12k	0805	1	-
R4	15k	0805	1	-
R6	20k	0805	1	-
R7	150k	0805	1	-
R8 – R12, R14, R15, R17, R18, R20, R21	470Ω	0805	11	-
R13, R16, R19, R22	820Ω	0805	4	-
LED1 –LED11	-	0805	11	-
Z1, Z2	-	DO214AC	2	SMAJ15A
MD1 – MD3, MH	-	POWERPAK SO-08	4	SIR158DP
IC1 – IC4	-	DRC-S-PVSON-N10	4	BQ24013
IC5	-	QFN28	1	LTC4236
BT1 – BT4	4,2 V	18650	4	Li-Ion akumulátor
BTH1 – BTH4	-	18650	4	Držiak Li-Ion článku
VIN1, VOUT	-	XT60	2	Konektorová vidlica
PINHD1	-	-	1	Konektorová lišta 2x4
PINHD2	-	-	1	Konektorová lišta 1x5

Schéma zapojenia napájacieho systému *hotswap_chargers_v2*



DPS napájacieho systému *hotswap_chargers_v2*

