



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

PISTOLOVÁ PÁJEČKA S NAPÁJENÍM Z BATERIÍ LI-ION

SOLDERING GUN WITH LI-ION BATTERY SUPPLY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Miroslav Bartoš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Martiš

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Miroslav Bartoš

ID: 158104

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Pistolová páječka s napájením z baterií Li-Ion

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Zjistěte potřebné výstupní parametry měniče, který nahradí stávající transformátor v páječce. Vyberte vhodnou topologii měniče a dimenzujte součástky silového obvodu.
2. Navrhněte řídicí obvody měniče.
3. Určete vhodné konstrukční uspořádání nových obvodů uvnitř stávajícího obalu páječky.
3. Navrhněte desku plošných spojů (DPS), vyrobte a osadte ji.
4. Elektroniku oživte a proveďte konstrukci páječky (vestavbu nových obvodů do stávajícího obalu).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PATOČKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.

[2] Vorel P., Patočka M.: Průmyslová elektronika (skriptum VUT)

[3] Vorel P., Procházka P.: Řídicí členy v elektrických pohonech (skriptum VUT)

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 21.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Jan Martiš

Konzultant:

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem bateriově napájené páječky. Páječka bude umístěna v plastové krabičce z klasické transformátorové páječky.

Nejprve je potřeba zjistit parametry původní páječky. Poté budou navrženy synchronní snižující měnič, řízení měniče, obvody BMS a rozmístění komponent v plastové krabičce.

Bateriově napájená páječka byla úspěšně oživena a otestována, konečné parametry měniče jsou: napětí 0,4 V při proudu 80 A. Celkový výkon na pájecí smyčce je 32 W.

Technicky se jedná o velice zajímavou alternativu ke klasické verzi páječky, kdy se může využívat při montážích či opravách ve špatně dostupných místech.

Klíčová slova

Páječka, synchronní snižující měnič, spínaný zdroj, vysoký proud, baterie

Abstract

This master's thesis deals with the design of battery powered soldering iron. The soldering iron will be placed in the plastic box from a conventional transformer soldering iron.

First, we need to find the parameters of the original transformer soldering iron. Then design a synchronous step-down converter, driver of converter, BMS circuits, and component placement in a plastic box.

The battery-powered soldering iron was successfully revived and tested, the final parameters of the converter are: voltage 0.4 V at 80 A current. The total power on the soldering wire is 32 W.

Technically, this is a very interesting alternative to the classic version of the soldering iron, which can be used for assembly or repairs in poorly accessible locations.

Keywords

Solder iron, synchronous step-down converter, switching power supply, large current, batteries

Bibliografická citace:

BARTOŠ, M. *Pistolová páječka s napájením z baterií Li-Ion*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Martiš.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Pistolová páječka s napájením z baterií Li-ion jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 21. května 2018

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Martišovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 21. května 2018

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	13
2	páječky	14
2.1	Transformátorové páječky	14
2.2	Parametry transformátorové páječky	16
3	Návrh koncepce a umístění	20
3.1	Volba koncepce	21
3.2	Volba akumulátoru	21
4	Návrh měniče a pomocných obvodů	22
4.1	Výběr topologie měniče	22
4.2	Volba spínací frekvence	23
4.3	Dimenzování tranzistorů měniče	24
4.3.1	Výpočet ztrát	25
4.4	Návrh tlumivky měniče	27
4.5	Dimenzování kondenzátoru meziobvodu	27
4.6	Návrh řídicích obvodů	28
4.6.1	Návrh astabilního klopného obvodu se Schmittovým invertorem	28
4.6.2	Návrh obvodů zajišťujících odskok	31
4.6.3	Návrh budičů	32
4.7	Návrh BMS	33
4.8	Návrh Step-up měniče	34
5	Realizace zařízení a výsledky měření	35
5.1	Celkové schéma zařízení	35
5.1.1	Deska s výkonovým měničem	35
5.1.2	Pomocná deska	36
5.2	Desky plošných spojů	37
5.2.1	Silová deska s měničem	37
5.2.2	Pomocná deska	41
5.3	Celkové zařízení	43
5.4	Oživení měniče	44
5.5	Naměřené průběhy	44
5.6	Výsledky konstrukce	51
6	Závěr	53
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	55

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Rozebraná transformátorová páječka	15
Obr. 2.2 Schéma trafopáječky	15
Obr. 2.3 Fotografie modifikované transformátorové páječky	16
Obr. 2.4 Napětí naprázdno transformátorové páječky	17
Obr. 2.5 Napětí a proud transformátorové páječky při zatížení	17
Obr. 3.1: Model bateriově napájené páječky	20
Obr. 3.2: Navržená koncepce páječky	21
Obr. 4.1 Schéma synchronního snižujícího měniče	23
Obr. 4.2 Schéma použitého astabilního klopného obvodu se Schmittovým invertorem	28
Obr. 4.3 Schéma nabíjení kondenzátoru v astabilním klopném obvodu	29
Obr. 4.4 Schéma vybíjení kondenzátoru v astabilním klopném obvodu	30
Obr. 4.5 Schéma odskoku	32
Obr. 5.1: Schéma pomocné desky	36
Obr. 5.2: Silová deska ze strany součástek	37
Obr. 5.3: Silová deska ze strany spojů	37
Obr. 5.4 Deska plošných spojů měniče - vrstva BOTTOM	38
Obr. 5.5 Rozmístění součástek na desce plošných spojů - vrstva BOTTOM	38
Obr. 5.6 Deska plošných spojů měniče - vrstva 15	39
Obr. 5.7 Deska plošných spojů měniče - vrstva 2	39
Obr. 5.8 Deska plošných spojů měniče - vrstva TOP	39
Obr. 5.9 Rozmístění součástek na desce plošných spojů - vrstva TOP	40
Obr. 5.10 Pomocná deska plošných spojů	41
Obr. 5.11 Rozmístění součástek na pomocné desce plošných spojů	42
Obr. 5.12 Fotografie celkové bateriově napájené páječky	43
Obr. 5.13: Napětí na řídicích elektrodách	45
Obr. 5.14: Napětí na řídicích elektrodách - detail	46
Obr. 5.15: Budící signály tranzistorů - včetně frekvence a střídý	47
Obr. 5.16: Napětí Drain - Source spodních tranzistorů	48
Obr. 5.17: Napětí Drain - Source horních tranzistorů	49
Obr. 5.18: Napětí a proud na výstupu	50
Obr. 5.19: Průběh proudu tekoucí z baterie	51

Seznam tabulek

Tab. 4.1: Parametry tranzistoru BSC010NE2LSATMA1 [2].....	25
Tab. 5.1 Seznam součástek na DPS měniče včetně řízení.....	40
Tab. 5.2 Seznam součástek pro pomocnou DPS.....	42

1 ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá návrhem bateriově napájené páječky. Teorie je taková, že se nejprve změří parametry klasické transformátorové páječky, poté navrhne měnič, baterie, BMS systémy a vše se zakomponuje do původní plastové krabičky.

Transformátorová páječka je stále velmi hojně využívanou pomůckou pro pájení v elektronice. Její výhoda spočívá v jednoduchosti, možnosti nabrat pájku na oko páječky, páječku vypnout a tím zbytečně nepřepalovat cín. Také náhradní hroty jsou velice snadno a levně vyměnitelné.

Vzhledem k pokroku, který se v posledních letech odehrál na poli bateriových technologií, se předpokládá, že je možné vyrobit bateriově napájenou páječku, která bude mít stejnou velikost i parametry jako páječka transformátorová se síťovým kabelem. Předpokládaná pracovní doba na baterie je okolo půl až jedné hodiny. Tím odpadá nutnost tahání prodlužovacích šňůr kupříkladu ve špatně dostupných lokacích v místech montáží či oprav.

Z praktického měření parametrů klasických transformátorových páječek se vybere vhodné napětí a proud nového měniče. Předpokládá se napětí okolo 0,5 V a proud v řádech stovek ampér (přibližně 200 A). Při takto velkých proudech se nabízí využití buď měniče s transformátorem, ovšem bez výstupního usměrňovače nebo snižujícího (step-down) měniče. Při použití snižujícího měniče by se ovšem muselo použít jeho modifikované verze – synchronní snižující měnič pro snížení ztrát na diodě.

Po výběru vhodného měniče je třeba celý tento měnič navrhnout, což spočívá ve výběru tranzistorů, výpočet ztrát na tranzistorech, návrh vinutých dílů, návrh řízení, ochrany a návržení schématu. Je nutné se také věnovat otázce ochrany lithium iontové baterie, tedy systému BMS.

Posledním problémem celého systému bude umístění všech potřebných komponent do původní plastové krabičky transformátorové páječky. Je plánováno použití baterií Li-ion o velikosti 18650, případně 26650. Výběr typu bude záležet na prostorovém uspořádání uvnitř krytu, případně na maximálním vybíjecím proudu.

2 PÁJEČKY

Páječky jsou v naprosté většině elektrické nářadí, které se používá pro tavení kovů pro elektrické i mechanické spojování součástek k desce plošných spojů.

Tavené kovy se nazývají pájky a jsou to většinou slitiny cínu, olova a dalších kovů. Teplota tání běžně používaných pájek je v rozmezí 180 – 300 °C. Z toho vyplývá, že teplota aktivní části páječek musí tuto hodnotu bezpečně překonávat. Z důvodu existence zmíněného rozmezí teploty tání pájek je ideální, aby páječka měla regulovatelnou teplotu hrotu. Tím lze jednak nastavit vhodnou teplotu hrotu pro roztavení pájky, a dále zamezit zbytečnému přehřívání či přepalování pájky.

2.1 Transformátorové páječky

Transformátorová páječka, je jedna z nejjednodušších typů páječek, avšak stále, díky svým výhodám používaná. Kvůli svému tvaru se občas nazývá pistolová páječka.

Mezi výhody patří jednoduchost, levné pořizovací náklady, krátká doba nahřátí, možnost vypnutí nahřívání oka, a tím nepřepalování cínu, a dále levná, rychlá a jednoduchá výměna pájecího oka. Mezi nevýhody patří rozměr oka, kdy velkým okem většinou nelze pájet malé SMD součástky, nemožnost regulovat teplotu oka, a napěťové překmity při sepnutí páječky, které mohou poškodit citlivé integrované obvody.

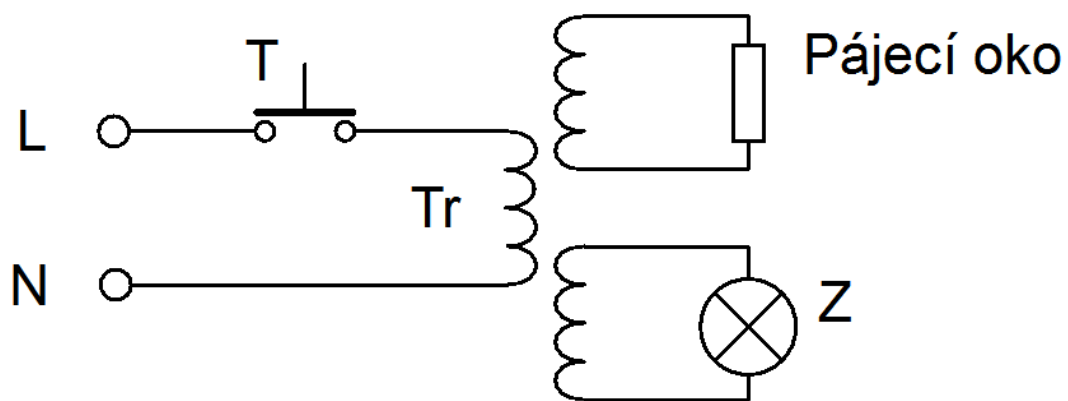
Páječka obsahuje transformátor, kde je na primární vinutí přivedeno přes spínač síťové napětí. Na sekundární vinutí je připojeno pájecí oko, vyrobené většinou z mědi. Vlivem průchodu proudu se toto oko zahřívá a od něho se následně taví pájka. Většina trafopáječek má dvě sekundární vinutí, z nichž druhé je použito pro napájení malé žárovky pro osvětlení pracovního prostoru. Fotografie rozebrané transformátorové páječky je uveden na Obr. 2.1.

Schéma transformátorové páječky je uvedena na obrázku Obr. 2.2.

Tato páječka sloužila jako základ pro modifikaci na napájení Li-ion bateriemi. Typ této páječky je SG109-100. Postup bude takový, že se demontuje transformátor, místo kterého se umístí Li-ion baterie, BMS obvody pro baterie a výkonový měnič. Fotografie modifikované páječky je na obrázku Obr. 2.3.



Obr. 2.1 Rozebraná transformátorová páječka



Obr. 2.2 Schéma trafopáječky

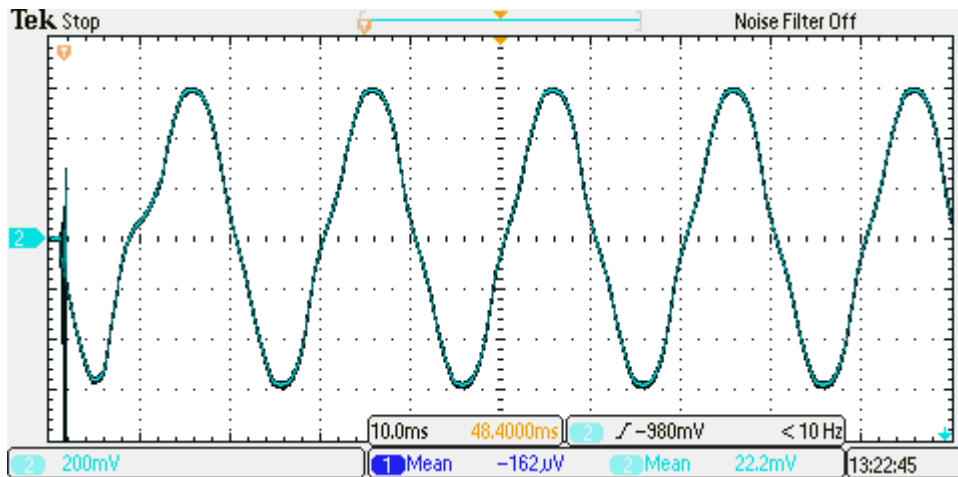


Obr. 2.3 Fotografie modifikované transformátorové páječky

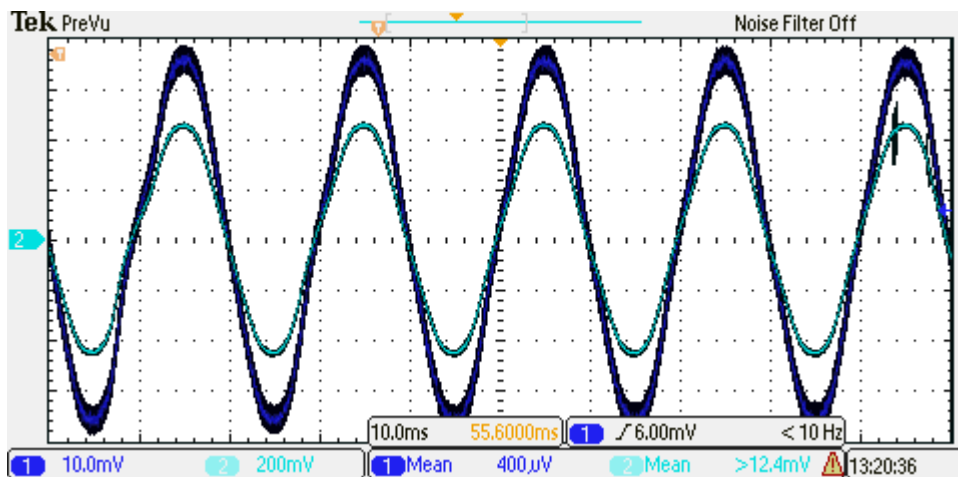
2.2 Parametry transformátorové páječky

Z důvodu nefunkčnosti modifikované trafopáječky musely být parametry změřeny na jiném modelu. Proud byl měřen za pomoci proudové sondy, napětí za pomoci napěťové sondy.

Na druhý kanál osciloskopu je připojena napěťová sonda, na první kanál je připojena proudová sonda. Napěťový rozsah je 200 mV/dílek, proudová sonda má měřící rozsah 100 A/10 mV. Oscilografy jsou uvedeny na Obr. 2.4 a Obr. 2.5.



Obr. 2.4 Napětí naprázdno transformátorové páječky



Obr. 2.5 Napětí a proud transformátorové páječky při zatížení

Z grafu na Obr. 2.4 lze vyčíst, že napětí naprázdno v amplitudě dosahuje hodnoty $U_{0_max} = 600 \text{ mV}$. Průběh je přibližně sinusový, tudíž se může psát, že efektivní hodnota napětí naprázdno se vypočítá jako:

$$U_{0_ef} = \frac{U_{0_max}}{\sqrt{2}} = \frac{0,6}{\sqrt{2}} = 0,424 \text{ V} \quad (2.1)$$

Z Obr. 2.5 lze vyčíst, že při zatížení napětí v amplitudě dosahuje přibližně hodnoty $U_{z_max} = 420 \text{ mV}$. Efektivní hodnota napětí při zatížení se vypočítá jako:

$$U_{z_ef} = \frac{U_{z_max}}{\sqrt{2}} = \frac{0,42}{\sqrt{2}} = 0,297 \text{ V} \quad (2.2)$$

Z téhož obrázku lze vyzorovat, že napětí, které reprezentuje procházející proud pájecím okem je přibližně $U_1 = 35 \text{ mV}$. Skutečný proud procházející zátěží se vypočítá jako:

$$I_{z_{max}} = U_1 \cdot k = 35 \cdot 10^{-3} \frac{100}{10 \cdot 10^{-3}} = 350 \text{ A} \quad (2.3)$$

kde k je měřící rozsah proudové sondy.

Tato hodnota je opět v amplitudě, tudíž je nutné proud přepočítat na efektivní hodnotu:

$$I_{z_{ef}} = \frac{I_{z_{max}}}{\sqrt{2}} = \frac{350}{\sqrt{2}} = 247,487 \text{ A} \quad (2.4)$$

Tyto hodnoty byly měřeny při pokojové teplotě. Bylo dbáno na to, aby byla páječka spuštěna na nejmenší možnou dobu potřebnou k záznamu tak, aby nedošlo k ohřevu oka. Předpokládá se, že i pájecí oko mělo teplotu přibližně okolo $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Odpor, při této teplotě, pájecího oka a pájecích kleští se vypočítá jako:

$$R_{z_{20}} = \frac{U_{z_{ef}}}{I_{z_{ef}}} = \frac{0,297}{247,487} = 1,2 \cdot 10^{-3} \Omega = 1,2 \text{ m}\Omega \quad (2.5)$$

Naprostou většinu tohoto odporu tvoří odpor pájecího oka. Měřená pájka využívá měděnou pájecí smyčku, kdežto pájka určená pro rekonstrukci využívá smyčku tvořenou z neidentifikovatelného materiálu, pravděpodobně na bázi niklu a železa. Z tohoto důvodu bude pro konstrukci nové páječky uvažován dvojnásobný odpor než odpor původní páječky.

Pro dosažení stejného výkonu na hrotu páječky je tedy nutné zvýšit napětí na dvojnásobek, tím pádem klesne proud na polovinu. To je pro tento případ velice výhodné, neboť klesnou i ztráty v tranzistorech a klesne proudové namáhání desky plošných spojů. Navíc, původní proud je velice vysoký, měnič na tento proud by pravděpodobně nebylo možné vyrobit a uchládit, protože ztráty by se velice špatně z plastového krytu odváděly.

Z výše popsaných skutečností bylo rozhodnuto, že navrhovaný měnič bude mít následující parametry:

- Napětí $U_z = 0,6 \text{ V}$
- Proud $I_z = 125 \text{ A}$

Je důležité také upozornit, že uvedené parametry jsou uvažovány s teplotou pájecí smyčky přibližně $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Takovýto stav v zapnuté trafopájce nastává velice

výjimečně, v podstatě pouze na začátku pájení. Během několika málo okamžiků se teplota pájecího oka dostává na bod tání pájky, tedy na teplotu v rozmezí 200°C – 350°C. Vzhledem k teplotní závislosti odporu na teplotě dochází k rapidnímu růstu odporu smyčky a tím pádem dochází i k poklesu proudu. Je ale nutné, aby nová pájka dosahovala podobných parametrů, aby ohřev hrotu netrval neúměrně dlouhou dobu.

3 NÁVRH KONCEPCE A UMÍSTĚNÍ

Pro správný návrh měniče a celého zapojení je nejprve potřeba určit rozmístění jednotlivých součástí páječky. Model páječky byl vytvořen v programu Autodesk Inventor a je vyobrazen na Obr. 3.1. Pro přehlednost nebyly modelovány vodiče.

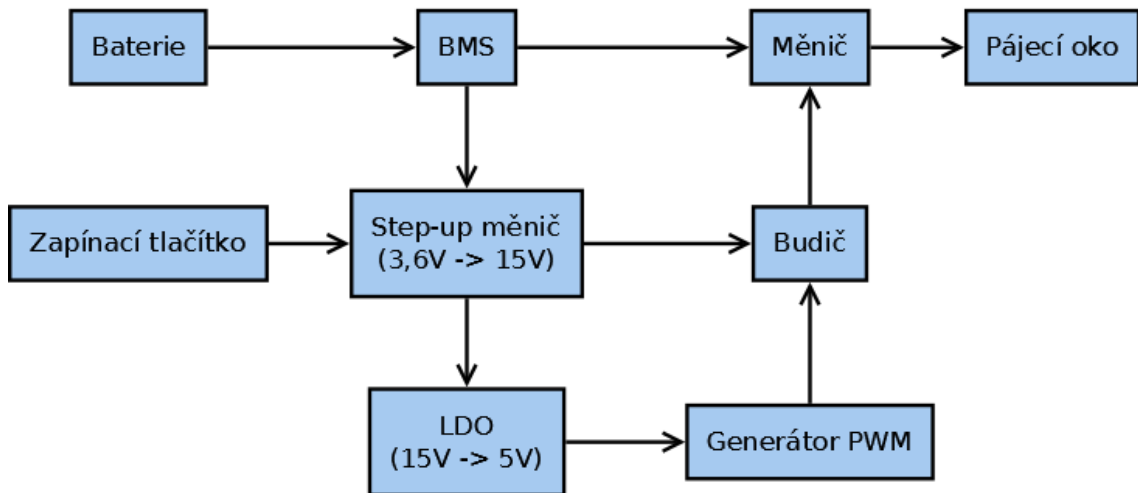


Obr. 3.1: Model bateriově napájené páječky

V místě vzniklém po transformátoru budou umístěny baterie a měnič. Měnič bude umístěn v prostoru nad bateriemi. Toto místo bylo vybráno z důvodu, že poskytuje největší možný prostor pro desku plošných spojů a tedy i největší plochu pro chlazení tranzistorů. Toto místo je též výhodné z důvodu blízkosti pájecích kleštin a oka, nebude tedy nutné vést vodiče na velkou vzdálenost. V držadle páječky bude umístěn druhý plošný spoj, který bude sloužit jednak jako BMS, tedy obvod zajišťující udržování článků v dobré kondici, jednak bude obsahovat zvyšující měnič, který bude napájet řídicí a budící obvody tranzistorů a tavnou pojistku.

3.1 Volba koncepce

Z výše uvedených skutečností vyplývá návrh celkové koncepce bateriově napájené páječky, který je uveden na Obr. 3.2.



Obr. 3.2: Navržená koncepce páječky

Za bateriemi je umístěno BMS, neboli Battery Management System. Tento systém se stará o správné vybíjení článků, hlídá zejména vybíjecí proud a napětí. V případě jakékoliv nestandardní situace odpojí baterie a tím je ochrání. Následuje měnič, za kterým je pájecí oko. Pro buzení tranzistorů je třeba napětí o velikosti 15 V, z tohoto důvodu je ve schématu uveden step-up měnič. Na generování PWM je ale zase potřeba napětí 5 V a proto je tu uveden lineární stabilizátor napětí (LDO).

3.2 Volba akumulátoru

Z modelu na Obr. 3.1 je vidět, že do plastového pouzdra po klasické transformátorové páječce, se vejdu čtyři kusy baterií Li-ion o formátu 18650. V tomto kódovém označení je zakomponována velikost článku. Jedná se tedy o válcový článek o průměru 18 mm a délce 65 mm. Budou použity články ze skladových zásob od společnosti Sanyo, každý o kapacitě 2,3 Ah a jmenovitém napětí 3,6 V. Celková uložená energie v baterii je 33,12 Wh.

4 NÁVRH MĚNIČE A POMOCNÝCH OBVODŮ

4.1 Výběr topologie měniče

Pro návrh měniče s parametry popsány v kapitole 2 máme v podstatě dvě možnosti měničů a to:

- Měnič s transformátorem (propustný či blokující měnič)
- Měnič bez transformátoru (snižující měnič)

Pro využití výhod měničů s transformátorem je nutné, aby měnič neměl výstupní usměrňovač, na kterém by vznikaly zbytečně velké ztráty. To znamená, že pájecí oko by bylo napájeno vysokofrekvenčním proudem, ale to nevadí, protože nás zajímá pouze střední výkon, který ohřívá oko na takovou teplotu, aby dokázalo roztavit cínovou pájku.

Při výběru tohoto typu měniče je ale nutné zjistit indukčnost proudovodné dráhy, která by omezovala velikost proudu. Indukčnost, změřená LRC metrem, vyšla $L = 145,46 \text{ nH}$. Výpočet reaktance proudovodné smyčky se vypočítá jako:

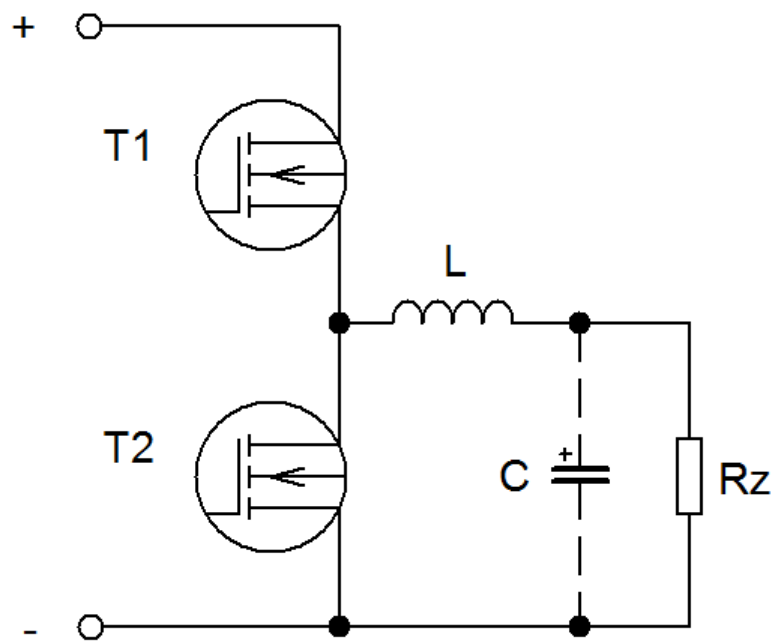
$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi fL = 2\pi \cdot 50000 \cdot 145,46 \cdot 10^{-9} = 45,698 \cdot 10^{-3} \Omega \\ &= 45,698 \text{ m}\Omega \end{aligned} \quad (4.1)$$

kde f je předpokládaná spínací frekvence, v tomto případě $f = 50 \text{ kHz}$.

Lze vidět, že reaktance proudovodné dráhy při spínací frekvenci $f = 50 \text{ kHz}$ je více než 19x vyšší než hodnota činného odporu. To znamená, že pokud bychom použili topologii měniče jako propustný nebo blokující měnič bez výstupního usměrňovače, museli bychom dodávat do zátěže obrovský výkon. Tím by se ovšem baterie páječky zbytečně vybíjela na neúčinném jalovém výkonu. Z tohoto důvodu nebude dále s touto topologií počítáno.

Druhou možností je použít snižující měnič. Pokud by se použila klasická koncepce snižujícího měniče s diodou, ztráty na diodě by dosahovaly enormních hodnot. Použije se tedy synchronní snižující měnič, jehož základní schéma je uvedeno na Obr. 4.1. V podstatě se nulová dioda vymění za tranzistor, který musí být sepnutý v době, kdy je horní tranzistor rozepnutý a naopak. Je nutné do spínacích průběhů zakomponovat odskok, aby nedošlo k sepnutí horního a spodního tranzistoru v jednu chvíli, čímž by se vytvořil zkrat a zničily by se tranzistory. Tlumivka v zapojení je z principu funkce měniče potřebná, ovšem výstupní kondenzátor potřebný není. Sice se tím zvýší zvlnění výstupního napětí,

ale to nevadí, protože jak je uvedeno výše, zajímá nás pouze teplota pájecího oka. V tomto případě by bylo též velice obtížné elektrolytický kondenzátor umístit, neboť by musel být velice blízko pájecí smyčky. Z těchto důvodů se výstupní kondenzátor nepoužije.



Obr. 4.1 Schéma synchronního snižujícího měniče

4.2 Volba spínací frekvence

Na spínací frekvenci jsou kladeny dva protichůdné požadavky. Na jednu stranu je požadavek mít spínací frekvenci co největší, protože tím dochází ke zmenšování vinutých dílů. Na druhou stranu s vyšší frekvencí rostou i přepínací ztráty v tranzistorech, více se projevují parazitní vlastnosti měniče ale hlavně, zásadním způsobem rostou ztráty, které vznikají na substrátové nulové diodě ve spodním tranzistoru. Tato dioda vede proud v době odskoku, tedy čím vyšší bude frekvence, tím častěji poteče proud přes tyto diody. Z tohoto důvodu se použije relativně nízká frekvence 50 kHz.

4.3 Dimenzování tranzistorů měniče

Tranzistory měniče je potřeba dimenzovat jak proudově, tak i napěťově. Jak je uvedeno v kapitole 3.2, na napájení bateriové páječky budou použity baterie Li-ion typu 18650 v celkem čtyřech kusech. Ty mají maximální napětí $U_{bat_max} = 4,2$ V a minimální $U_{bat_min} = 3$ V. Pro snižující měnič je vhodnější, aby všechny čtyři baterie byly zapojeny paralelně. Pokud by byly zapojeny sériově, vzrostlo by vstupní napětí U_d a tím by se snížila střída. Celý návrh bude proveden dle [1].

Napěťové namáhání tranzistorů se volí jako dvojnásobek napájecího napětí, tranzistory by tedy měly být dimenzovány přibližně na 8,4 V.

Pro proudové dimenzování je nejprve potřeba vypočítat střídu měniče. Jmenovité napětí použité Li-ion baterie je $U_d = 3,6$ V. Střída se vypočítá jako:

$$s_n = \frac{U_z}{U_d} = \frac{0,6}{3,6} = 0,167 \quad (4.2)$$

To, že se počítá se jmenovitým napětím baterie není na škodu. Pokud bude baterie nabitá na vyšší napětí, střída bude klesat, pokud bude nabitá na nižší napětí, střída bude růst. Z vybíjecí charakteristiky je ale patrné, že střída bude většinou okolo hodnoty výše vypočtené. Dále je nutné vypočítat maximální, střední i efektivní proud jak horním, tak i dolním tranzistorem.

$$I_{Cmax} = I_z = 125 \text{ A} \quad (4.3)$$

$$I_{Cstř} = I_z \cdot s = 125 \cdot 0,167 = 20,875 \text{ A} \quad (4.4)$$

$$I_{Cef} = I_z \cdot \sqrt{s} = 125 \cdot \sqrt{0,167} = 51,082 \text{ A} \quad (4.5)$$

$$I_{C0max} = I_z = 125 \text{ A} \quad (4.6)$$

$$I_{C0stř} = I_z \cdot (1 - s) = 125 \cdot (1 - 0,167) = 104,125 \text{ A} \quad (4.7)$$

$$I_{C0ef} = I_z \cdot \sqrt{1 - s} = 125 \cdot \sqrt{1 - 0,167} = 114,086 \text{ A} \quad (4.8)$$

Byly vybrány tranzistory BSC010NE2LSATMA1 od společnosti Infineon Technologies, které mají následující parametry [2]:

Tab. 4.1: Parametry tranzistoru BSC010NE2LSATMA1 [2]

Maximální napětí drain-source	U_{DSmax}	25	V
Typický odpor v sepnutém stavu	R_{DSon_typ}	0,8	m Ω
Trvalý proud	I_D	100	A
Špičkový proud	$I_{D,pulse}$	400	A
Zapínací doba	t_{on}	12,7	ns
Vypínací doba	t_{off}	38,4	ns
Tepelný odpor čip – okolí, 6cm ² chladící plocha	R_{thJA}	50	K/W
Úbytek napětí na substrátové diodě	U_{SD}	0,8	V
Pouzdro SuperSO8 (PG-TDSON-8)			

4.3.1 Výpočet ztrát

Celkové ztráty v horním tranzistoru se skládají ze ztrát přepínacích a ztrát způsobených vedením proudu. Dle [3] se přepínací ztráty se vypočítají jako:

$$P_{Cztr_přep} = \frac{1}{4} U_{d_max} \cdot I_{Cmax} \cdot f (t_{on} + t_{off})$$

$$P_{Cztr_přep} = \frac{1}{4} 4,2 \cdot 125,50000 (12,7 \cdot 10^{-9} + 38,4 \cdot 10^{-9}) \quad (4.9)$$

$$= 0,335 \text{ W}$$

Ztráty způsobené vedením proudu se vypočítají jako:

$$P_{Cztr_ved} = R_{DSon} \cdot I_{Cef}^2 = 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 51,082^2 = 2,087 \text{ W} \quad (4.10)$$

Celkové ztráty na horním tranzistoru jsou součtem ztrát uvedených, tedy:

$$P_{Cztr_celk} = P_{Cztr_přep} + P_{Cztr_ved} = 0,335 + 2,087$$

$$= 2,422 \text{ W} \quad (4.11)$$

Tato hodnota vypočtených ztrát je poměrně vysoká pro tak malé pouzdro, z tohoto důvodu se použijí tranzistory dva zapojené paralelně. Přepínací ztráty zůstanou stejné, pouze se rozdělí do dvou pouzder, ztráty vedením se sníží na polovinu, tedy ztráty na jedno pouzdro budou čtvrtinové. Ztráty na jedno pouzdro tedy budou $P_{Cztr} = 0,689 \text{ W}$.

Ztráty na spodním tranzistoru se skládají ze ztrát způsobených vedením proudu a ztrát na vnitřní substrátové diodě. Tato dioda povede proud v době odskoku. Ztráty přepínací zde nevznikají.

Ztráty způsobené vedením proudu se vypočítají jako:

$$P_{C0ztr_ved} = R_{DSon} \cdot I_{C0ef}^2 = 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 114,086^2 = 10,412 \text{ W} \quad (4.12)$$

Ztráty způsobené průchodem proudu přes vnitřní substrátovou diodu tranzistoru se vypočítají jako součin úbytku napětí na této diodě, maximálním proudem spodním tranzistorem a poměrem doby, po kterou tato dioda vede proud. Jak bylo uvedeno výše, tato dioda vede proud v době odskoku, který byl stanoven jako dvojnásobek součtu zapínací a vypínací doby tranzistoru, tedy:

$$t_{odskok} = 2(t_{on} + t_{off}) = 4(12,7 \cdot 10^{-9} + 38,4 \cdot 10^{-9}) = 1,022 \cdot 10^{-7} \text{ s} = 102,2 \text{ ns} \quad (4.13)$$

Tyto ztráty se vypočítají jako:

$$P_{C0ztr_D} = \frac{t_{odskok}}{T} U_{SD} \cdot I_{C0max} = t_{odskok} \cdot f \cdot U_{SD} \cdot I_{C0max} = 1,022 \cdot 10^{-7} \cdot 50000 \cdot 0,8 \cdot 125 = 0,511 \text{ W} \quad (4.14)$$

kde T je perioda spínání tranzistorů.

Celkové ztráty ve spodním tranzistoru se vypočítají jako součet všech uvedených ztrát, tedy:

$$P_{C0ztr_celk} = P_{C0ztr_ved} + P_{C0ztr_D} = 10,412 + 0,511 = 10,923 \text{ W} \quad (4.15)$$

Tyto ztráty jsou extrémně vysoké pro takovéto pouzdro. Bylo tedy vybráno zapojení šesti tranzistorů zapojených paralelně. Ztráty způsobené vedením proudu budou šestkrát menší a zároveň se výkon rozloží do šesti pouzder, celkem tedy 36x menší ztráty na jedno pouzdro, ztráty způsobené průchodem proudu přes substrátovou diodu budou stejné, ale rozloží se mezi 6 pouzder. Celková ztráta na jeden tranzistor tedy bude $P_{C0ztr} = 0,374 \text{ W}$.

Celkově budou tedy použity dva tranzistory na místo jednoho horního tranzistoru a šest tranzistorů na místo jednoho spodního tranzistoru. Záměrem pro použití takto relativně vysokého počtu tranzistorů je co největší minimalizace

ztrát, které by mohly způsobovat vysoké přehřívání vnitřních částí měniče, především baterií. Dalším důvodem je celkově vysoká účinnost měniče pro zabezpečení dlouhé výdrže baterie. Celkové ztráty způsobené tranzistory budou $P_{ztr_celk} = 3,622 \text{ W}$.

4.4 Návrh tlumivky měniče

Tlumivka je pro princip činnosti měniče nezbytná. Ovšem vzhledem ke tvaru pájecích kleští a pájecího oka má proudovodná smyčka poměrně velkou parazitní indukčnost. Tuto parazitní indukčnost můžeme využít jako pracovní indukčnost. Je tedy nutné spočítat zvlnění proudu, pokud nebude použita žádná další tlumivka.

Dle [1] se zvlnění proudu vypočítá jako:

$$\begin{aligned} \Delta I_{max} &= \frac{U_d}{2f \cdot L} (1 - s_n) s_n \\ &= \frac{3,6}{2.50000.145,46 \cdot 10^{-9}} (1 - 0,167) 0,167 \quad (4.16) \\ &= 34,429 \text{ A} \end{aligned}$$

Je to tedy přibližně 27,5 % proudu zátěže. Tato hodnota je dostačující pro funkci bateriově napájené páječky. Tlumivka tedy nebude v tomto případě použita, jako pracovní indukčnost se využije parazitní indukčnost pájecích kleští.

4.5 Dimenzování kondenzátoru meziobvodu

Napěťově je potřeba kondenzátory dimenzovat alespoň na dvojnásobek maximálního napětí na baterii, tedy na 8,4 V. Kondenzátory se musí dimenzovat také proudově, tedy na maximální efektivní hodnotu proudu. Tento proud se vypočítá jako:

$$I_{kap} = \sqrt{I_{Cef}^2 - I_{Cstř}^2} = \sqrt{51,082^2 - 20,875^2} = 46,622 \text{ A} \quad (4.17)$$

Jako kondenzátory meziobvodu byly zvoleny keramické kondenzátory o kapacitě 10 μF , napětí 25 V a velikosti 1210, celkově o 36 kusech. Jedním kondenzátorem poteče téměř 1,3 A.

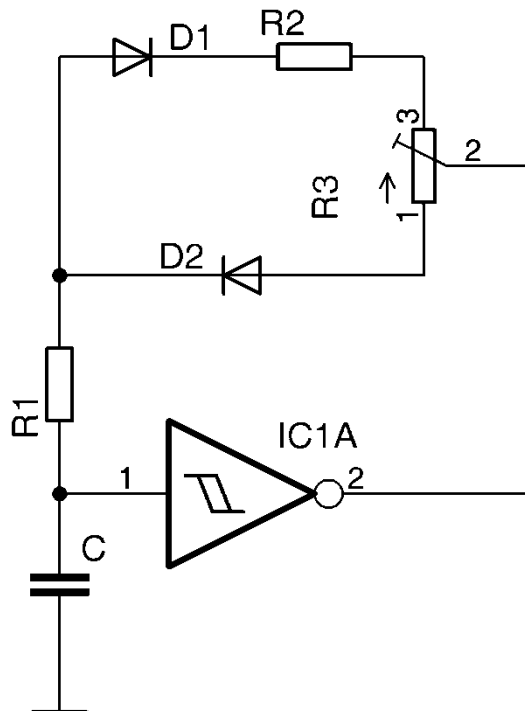
4.6 Návrh řídicích obvodů

Způsoby měření proudu měničem jsou při takto velkých proudech a omezené velikosti krabičky poměrně problematické. Pro zvýšení jednoduchosti a snížení ceny je přistoupeno ke zjednodušení v podobě neměření proudu měničem. Předpokládá se, že uživatel nepřipojí k páječce místo určené pájecí smyčky jiný vodič než takový, na který je páječka navržena, a tedy nedojde ke zničení měniče vlivem průchodu nadproudu, případně zkratového proudu.

Z těchto důvodů se přistoupilo k navržení řídicích obvodů nejjednodušší metodou a to řízení měniče za pomoci pulsně šířkové modulace, která bude generována astabilním klopným obvodem se Schmittovým invertorem. Pro zlepšení práce s páječkou bude umožněno regulovat za pomoci potenciometru střihu a tím i proud do zátěže.

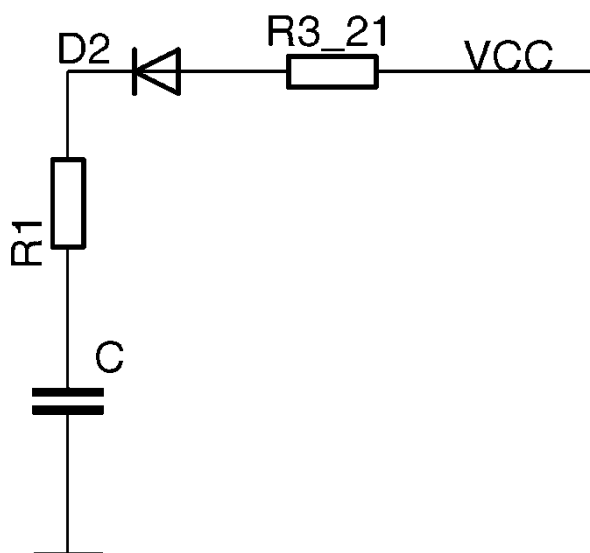
4.6.1 Návrh astabilního klopného obvodu se Schmittovým invertorem

Schéma takového řízení je uvedeno na Obr. 4.2. Ve schématu není uvedeno napájecí napětí U_{CC} .

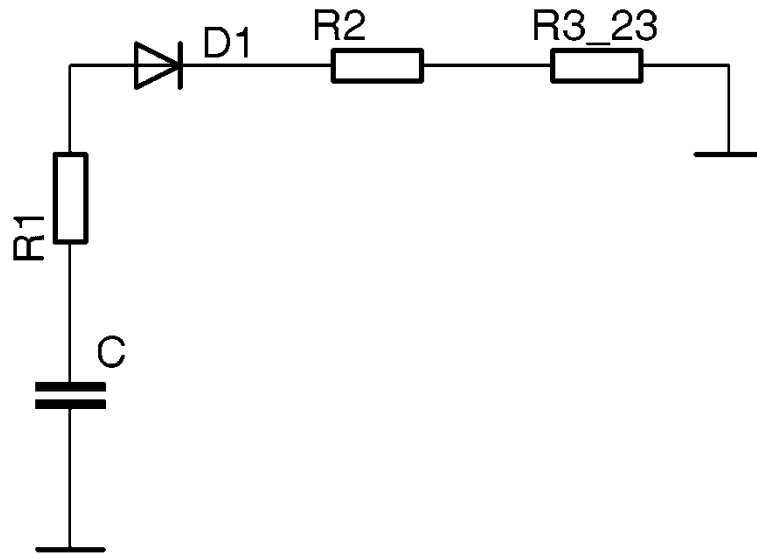


Obr. 4.2 Schéma použitého astabilního klopného obvodu se Schmittovým invertorem

Potenciometrem R3 se mění střída spínání. Po zapnutí napájení je napětí na kondenzátoru C pod dolní hysterezní komparační úrovní, tudíž výstup klopného obvodu bude shodný s napájecím napětím U_{CC} . Nabíjení kondenzátoru tedy probíhá z výstupu invertoru přes potenciometr R3, diodu D2 a odpor R1. Po přesáhnutí napětí na kondenzátoru horní hysterezní komparační úrovně dojde k překlopení astabilního klopného obvodu na zemní potenciál (GND). Kondenzátor se poté bude vybíjet přes odpor R1, diodu D1, odpor R2 a potenciometr R3. Odpor R2 zde slouží k hornímu omezení střídy. Dle [4] je proveden následující návrh klopného obvodu. Potenciometr v tomto zapojení lze chápat jako dva sériově zapojené odpory, označené kupříkladu jako R_{3_23} a R_{3_21} , vzhledem k označení vývodů potenciometru. Schéma při nabíjení kondenzátoru je uveden na Obr. 4.3, schéma vybíjení kondenzátoru je uvedeno na Obr. 4.4.



Obr. 4.3 Schéma nabíjení kondenzátoru v astabilním klopném obvodu



Obr. 4.4 Schéma vybíjení kondenzátoru v astabilním klopném obvodu

Rozdíl mezi horní hysterezní komparační úrovní a spodní hysterezní komparační úrovní se nazývá napěťová hystereze U_H . S ohledem na to, že napěťová hystereze má mnohem menší velikost než napájecí napětí lze exponenciální průběhy napětí na nabíjejícím se kondenzátoru nahradit lineárními průběhy, aniž bychom se dopustili velké chyby. Z tohoto důvodu se bude kondenzátor nabíjet i vybíjet přibližně konstantním proudem.

Nabíjecí proud se vypočítá jako:

$$I_{nab} = \frac{U_{cc} - 0,6}{2(R_1 + R_{3,21})} \quad (4.18)$$

Vybíjecí proud se vypočítá pomocí rovnice:

$$I_{vyb} = \frac{U_{cc} - 0,6}{2(R_1 + R_2 + R_{3,23})} \quad (4.19)$$

Dle [4] bude pro nabíjecí proud platit:

$$I_{nab} = C \frac{U_H}{t_{nab}} \quad (4.20)$$

Pro vybíjecí proud bude platit:

$$I_{vyb} = C \frac{U_H}{t_{vyb}} \quad (4.21)$$

Dosazením rovnice (4.20) do rovnice (4.18) a vyjádřením t_{nab} se dostane:

$$t_{nab} = 2(R_1 + R_{3_21})C \frac{U_H}{U_{cc} - 0,6} \quad (4.22)$$

Dosazením rovnice (4.21) do rovnice (4.19) a vyjádřením t_{vyb} se dostane:

$$t_{vyb} = 2(R_1 + R_2 + R_{3_23})C \frac{U_H}{U_{cc} - 0,6} \quad (4.23)$$

Doba t_{nab} je v podstatě součin střídy a periody frekvence spínání, doba t_{vyb} je součin doplňkové střídy a periody frekvence spínání.

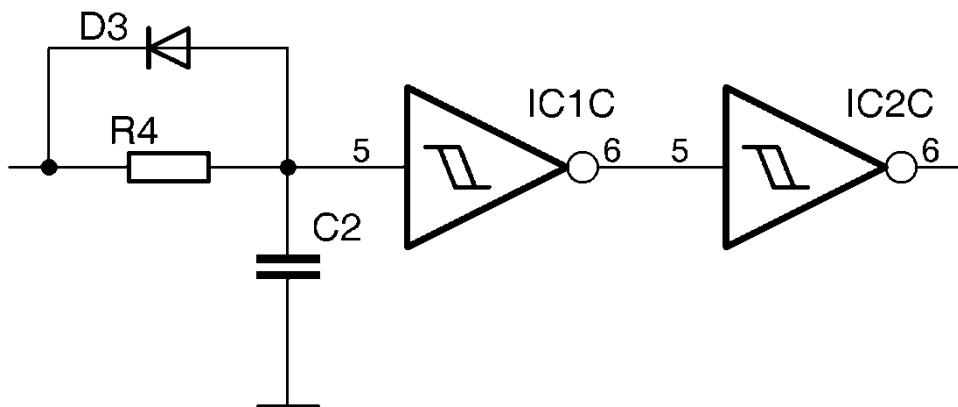
Byl vybrán Schmittův klopný obvod typu 74HCT14 od společnosti Nexperia (NXP). Parametry tohoto obvodu dle [5] jsou:

- Napájecí napětí $U_{cc} = 4,5 \text{ V} - 5,5 \text{ V}$
- Napěťová hystereze: $U_H = 0,6 \text{ V}$ při $U_{cc} = 5,5 \text{ V}$

Vyřešením rovnic (4.22) a (4.23) lze vypočítat potřebné parametry odporů, kondenzátoru a potenciometru. Hodnota kondenzátoru byla zvolena $C = 470 \text{ pF}$. Výsledné hodnoty odporů jsou: $R_1 = 24 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 110 \text{ k}\Omega$ a $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$.

4.6.2 Návrh obvodů zajišťujících odskok

Pro zabránění sepnutí horního a spodního tranzistoru do zkratu se používá hardwarová realizace odskoku. Nejjednodušší možností této realizace je uvedena na Obr. 4.5.



Obr. 4.5 Schéma odskoku

Princip této ochrany je takový, že při logické jedničce na vstupu se začne nabíjet kondenzátor C2 přes odpor R4. Po překročení horní hysterezní komparační úrovně Schmittova komparátoru (napětím na kondenzátoru) se komparátor přeploží do logické nuly. Sériově zapojeným klopným obvodem se výstup přeploží na logickou jedničku.

Při přivedení logické nuly na vstup dojde k rychlému vybití kondenzátoru C2 přes diodu D3. Tím se na výstup dostane logická nula (invertovaná druhým klopným obvodem) v podstatě okamžitě. Tím dojde ke zpoždění sepnutí tranzistorů, ale k okamžitému rozepnutí. Schmittův klopný obvod tu v podstatě funguje jako tvarovač výstupního signálu. C2 bylo zvoleno jako $C_2 = 470\text{pF}$. Nabíjení kondenzátoru lze popsat rovnicí:

$$u_c(t_{odskok}) = \left(1 - e^{-\frac{t_{odskok}}{\tau}}\right) \cdot U_{cc} \quad (4.24)$$

kde u_c je okamžité napětí na kondenzátoru a τ je časová konstanta, která se vypočítá jako:

$$\tau = R_4 C_2 \quad (4.25)$$

Řešením těchto rovnic je potřebný odpor, jehož hodnota je $R_4 = 330\ \Omega$.

4.6.3 Návrh budičů

Signály pro tranzistory je potřeba proudově posílit. Protože je použito šest tranzistorů spojených paralelně pro tranzistory namísto nulových diod, je potřeba

dodat relativně vysoký špičkový proud pro nabití hradlových kapacit u těchto tranzistorů. Byl vybrán dvoukanálový budič typu MCP14E4-E/SN od společnosti Microchip Technology, který je schopen dodat špičkový proud 4,5 A. Tento driver má zároveň i enable pin, který bude využit jako podpětová ochrana v řídicích obvodech. Tato ochrana má za úkol vyřadit spínání tranzistorů v případě, že poklesne napájecí napětí, čímž by mohlo docházet k nedokonalému spínání a vzrůstu ztrát až na takovou úroveň, že by mohlo dojít k jejich poškození.

4.7 Návrh BMS

Jelikož jsou všechny akumulátory zapojené paralelně, není třeba využívat složitější systémy pro balancování článků, jako je to v případě sériového zapojení. Je tedy nutné hlídat pouze vybíjecí proud a napětí baterie. Pokud by došlo v obvodu k nadproudu, případně zkratu, je třeba baterii odpojit a tím ji ochránit. Podobné je to i s napětím. Většinu Li-ion baterií lze vybit až do hodnoty napětí 2,5 V, vybití pod tuto hodnotu může baterii nevratně poškodit.

S takovými parametry lze s výhodou využít jednoúčelových integrovaných obvodů. Byl vybrán integrovaný obvod AP9101C od společnosti Diodes Incorporated, konkrétně typ AP9101CK6-ANTRG1. Tento obvod využívá MOSFET jako odpojovač baterie. Místo katalogového zapojení je použit pouze jeden tranzistor pro omezení ztrát, tím se ale přichází o možnost kontrolovat nabíjení baterie. Zároveň dokáže na tomto tranzistoru měřit úbytek napětí, a pokud překročí hodnotu 0,06 V, odpojí baterii. Tím je dán i maximální vybíjecí proud. Bude použit stejný tranzistor jako na snižující měnič. Maximální vybíjecí proud je dán:

$$I_{vyb_max} = \frac{U_{DOC}}{R_{DSon}} = \frac{0,06}{0,8 \cdot 10^{-3}} = 75 \text{ A} \quad (4.26)$$

, kde U_{DOC} je napětí detekce pro nadproud dle [6]. Tento proud je vysoký pro baterii použitou pro modifikaci. Nicméně je to pouze poslední možnost, jak odpojit baterii při zkratu. Pro jistotu bude v sérii s tímto systémem použita tavná pojistka o hodnotě 20 A.

Druhým důvodem pro použití tohoto obvodu je odpojení baterie, pokud napětí na ní poklesne pod 3,2 V. Baterii je možno vybit až do hodnoty 2,5 V, nicméně jí to příliš neprospívá. Pokud se bude baterie odpojovat už při 3,2 V, je možné prodloužit životnost baterie i na dvojnásobný počet cyklů.

Velice nízký odběr proudu, který je $3 \mu\text{A}$, zabezpečuje extrémně dlouhou výdrž na baterie.

4.8 Návrh Step-up měniče

Step-up, neboli zvyšující měnič, mění napětí z baterií na napětí o hodnotě 15V, které je použito pro buzení tranzistorů. Takovéto napětí je potřebné pro dokonalé spínání tranzistorů. Zároveň je potřeba, aby driver pro buzení tranzistorů měl enable pin, který bude použit pro zapnutí celé páječky. Teorie je taková, že poté, co se zmáčkne tlačítko na páječce, zvyšující měnič „vyrobí“ napětí o hodnotě 15 V, které je vedeno do budiče. Téže napětí je vedeno do lineárního stabilizátoru typu 7805, který napájí Schmittův klopný obvod. Klopný obvod začne vytvářet pulzy pro PWM, které jsou vedeny do budiče, a celý měnič se rozeběhne. Po uvolnění tlačítka, zvyšující zdroj přestane pracovat a tím se vypne celý měnič páječky. Z tohoto plyne, že integrovaný obvod pro zvyšující měnič bude celou dobu připojen k baterii, je tedy nutné aby měl velice nízký klidový odběr proudu. Dalším požadavkem je, aby IC uměl fungovat od napětí minimálně 3,2 V, což je napětí, při kterém odpojuje baterii BMS.

Všem těmto požadavkům vyhovuje obvod TPS55340 od společnosti Texas Instruments. Tento obvod má integrovaný 5 A 40 V MOSFET, je konfigurovatelný jako Boost, SEPIC nebo flyback měnič, má vstupní napětí od 2,9 V do 32 V, volitelnou spínací frekvenci v rozsahu 100 kHz až 1,2 MHz, má enable pin a ve vypnutém stavu (enable pin v logické nule) odebírá proud $2,7 \mu\text{A}$.

Návrh byl proveden dle instrukcí v datasheetu [7].

5 REALIZACE ZAŘÍZENÍ A VÝSLEDKY MĚŘENÍ

5.1 Celkové schéma zařízení

Celá bateriově napájená páječka bude umístěna na dvou deskách plošných spojů. Na první bude umístěn měnič včetně řídicích obvodů, na druhé potom obvody BMS a zvyšující měnič. Schémata uvedená v této kapitole jsou už na finální verzi páječky, tedy po oživení, změření celého systému a změně proudu, který bude popsán dále.

5.1.1 Deska s výkonovým měničem

Schéma první desky je uvedeno pro lepší čitelnost v Příloze A. Jak bude uvedeno dále, proud měničem byl úmyslně snížen na hodnotu přibližně 80 A. Z tohoto důvodu musely být změněny součástky obvodu řídicích obvodů a obvodů zajišťujících odskok.

Klopný obvod označený jako IC1C generuje signál PWM. Potenciometr připojený na kontakt JP1 má hodnotu 47 k Ω . Za astabilní klopný obvod se Schmittovým invertorem, který generuje PWM, je pro horní sadu tranzistorů vřazen další klopný obvod. Tento KO zajistí, že v době sepnutí horních tranzistorů nebudou sepnuty tranzistory dolní a naopak. Následuje obvod zajišťující odskok, samozřejmě jak u horních, tak i u dolních tranzistorů. Vzhledem k pomalejšímu vybíjení kapacit spodních tranzistorů musela být doba odskoků pro horní tranzistory zvětšena. Proto je hodnota R23 vyšší než hodnota odporu R24. Poté už je jenom budič tranzistorů, který proudově posílí spínací pulsy, které jsou vedeny na gate všech tranzistorů, kdy každý tranzistor má svůj odpor v gate. Dle [2] je doporučeno použít odpor o hodnotě 2 Ω .

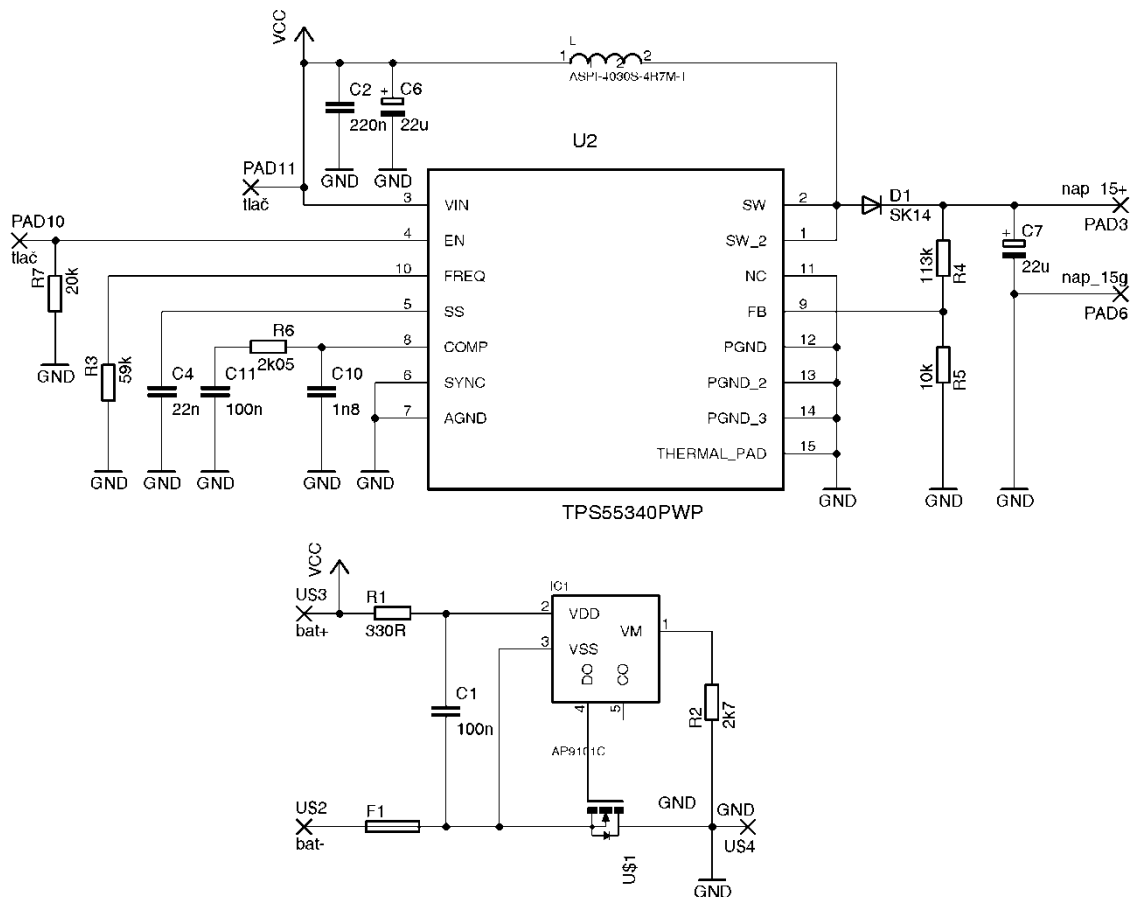
Zenerova dioda D5 zajišťuje podpětovou ochranu v řídicích obvodech. Jakmile napětí klesne pod hodnotu Zenerova napětí sečtenou s napětím spodní komparační úrovně Schmittova invertoru, překlopí se klopný obvod IC1F do jedničky, sériově zapojený KO se překlopí do nuly a tím znemožní (za pomoci enable pinu v budiči) spínání tranzistorů.

Ve spodní části schématu vidíme baterii kondenzátorů meziobvodu. Počet pozic je 18, nicméně na skutečném plošném spoji jsou kondenzátory umístěny dva nad sebou, celkově tedy 36 kondenzátorů, jak bylo navrženo.

Pro napájení Schmittova KO je zapotřebí napětí 5 V, které je generováno lineárním napěťovým stabilizátorem v SMD provedení 78L05.

5.1.2 Pomocná deska

Schéma druhé desky je na Obr. 5.1. Na této desce je umístěno BMS a zvyšující měnič, který zároveň slouží k zapnutí celé páječky.



Obr. 5.1: Schéma pomocné desky

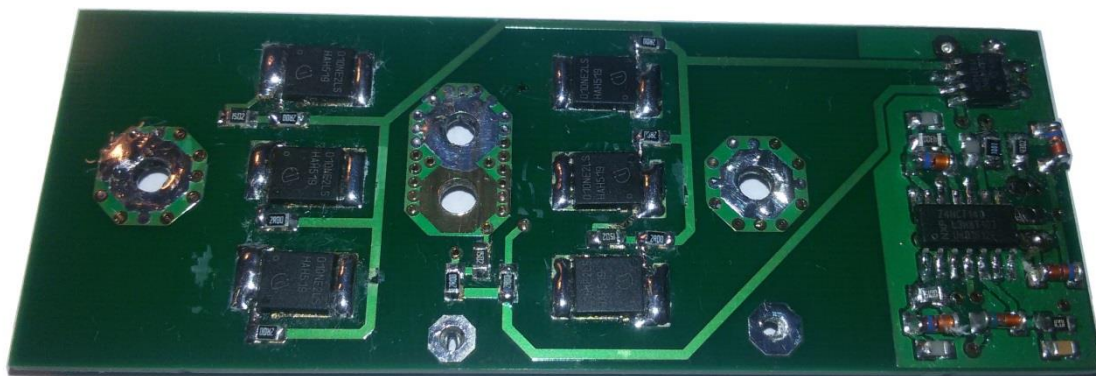
Integrované obvody na této desce budou trvale spojeny s baterií. Dalo by se říci, že páječka bude neustále v režimu stand-by, tedy nebude mít vlastní hlavní vypínač, ale bude neustále připravena k použití a jediným stiskem zapínacího tlačítka (připojeného na PAD10 a PAD11) lze začít pájet. Nicméně klidový odběr proudu zvyšujícího měniče a pracovní proud integrovaného obvodu zajišťující BMS

je na úrovni $5,7 \mu\text{A}$. V případě plně nabitě baterie by došlo k vybití, z důvodu trvalého zapojení těchto IC, za více než 160 let. Odběr je tedy mnohokrát nižší, než je ekvivalentní samovybíjení těchto článků.

5.2 Desky plošných spojů

5.2.1 Silová deska s měničem

Jedná se o profesionálně vyrobenou čtyřvrstvou desku s plátováním mědi $70 \mu\text{m}$. Schéma této desky je uvedeno v Příloze A. Vyrobená a osazená deska je uvedena na Obr. 5.2 a Obr. 5.3.



Obr. 5.2: Silová deska ze strany součástek



Obr. 5.3: Silová deska ze strany spojů

Na Obr. 5.2 je uvedena silová deska ze strany součástek. Lze na ní vidět šest kusů tranzistorů na místě nulové diody. V pravé části je Schmittův klopný obvod a budič. Na Obr. 5.3 je vyobrazena též deska ze strany spojů. Zde jsou dva

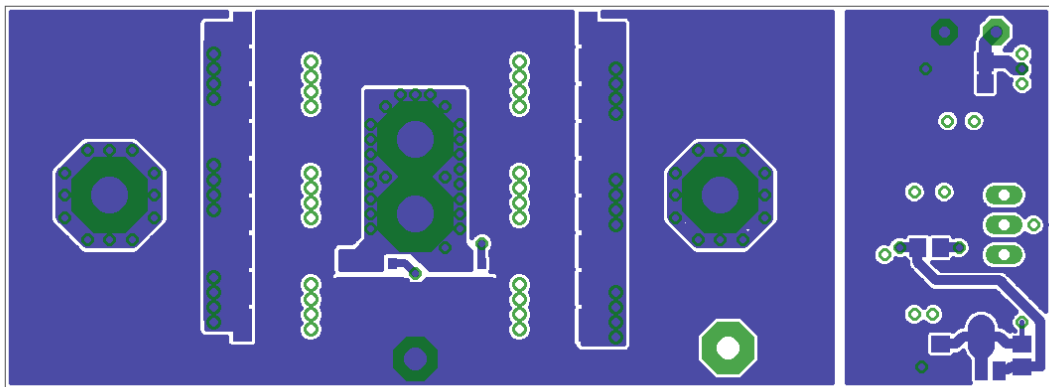
tranzistory zapojené paralelně, baterie kondenzátorů a v pravé části je lineární stabilizátor typu 78L05.

Návrh desky plošných spojů ze strany bottom je uveden na Obr. 5.4, rozmístění součástek téže strany je na Obr. 5.5. Rozlitá měď v této vrstvě je v levé části DPS signál VCC, v pravé části je 15 V pro napájení řídicí části.

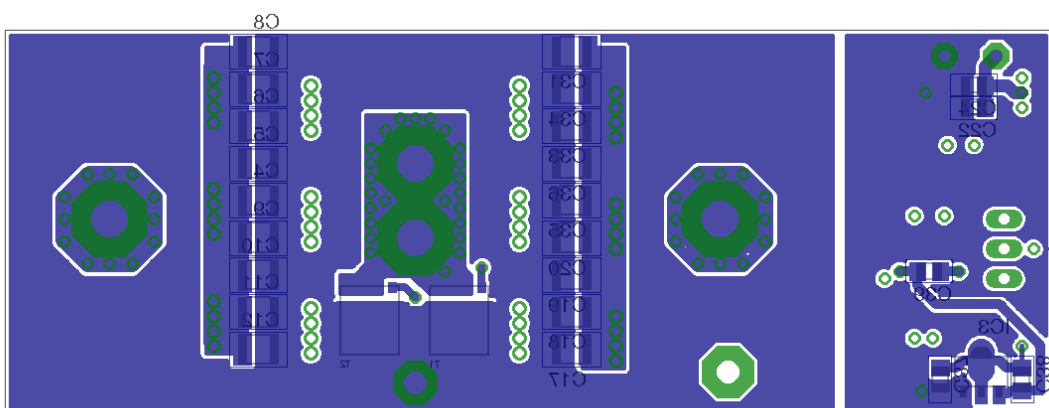
Návrh DPS ve vrstvě č. 15 (druhá vrstva odspodu) je na Obr. 5.6. Rozlitá měď v této vrstvě je spojena s výstupem měniče.

Plošný spoj ve vrstvě 2 (druhá vrstva od shora) je na Obr. 5.7. Rozlitá měď v této vrstvě je spojena se zemí (GND) měniče.

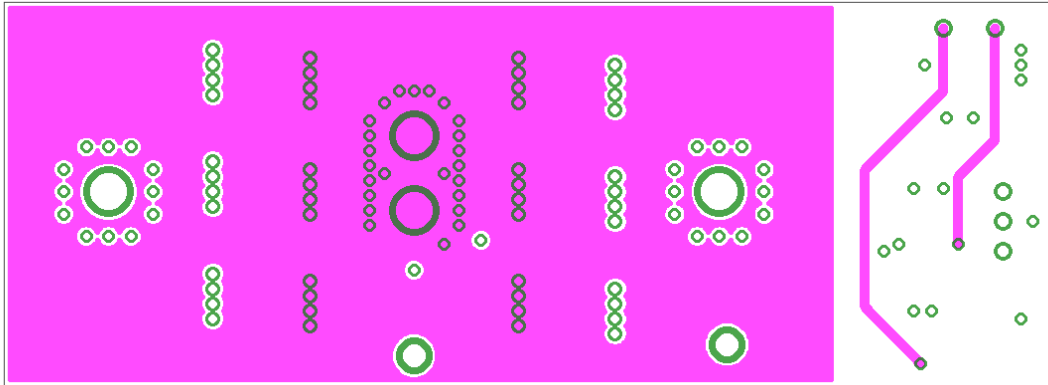
Poslední, čtvrtá vrstva (TOP) je na Obr. 5.8 společně s rozmístěním součástek této desky na Obr. 5.9. Tato vrstva je signální a slouží k rozvedení signálů ke gate tranzistorů.



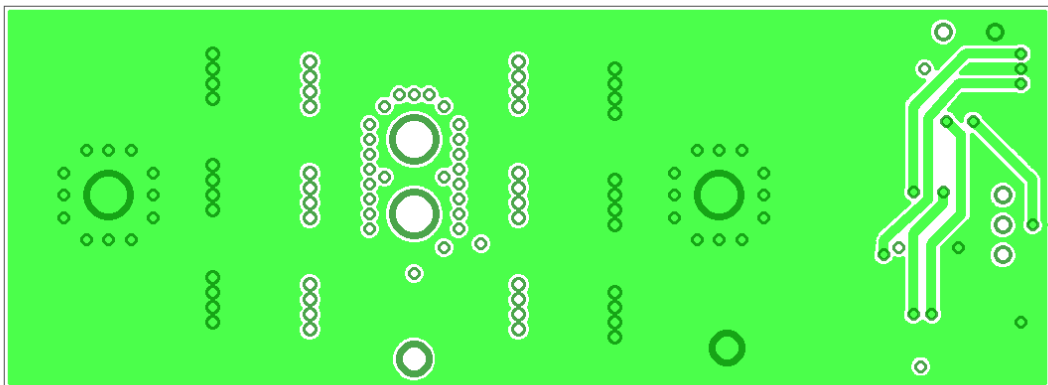
Obr. 5.4 Deska plošných spojů měniče - vrstva BOTTOM



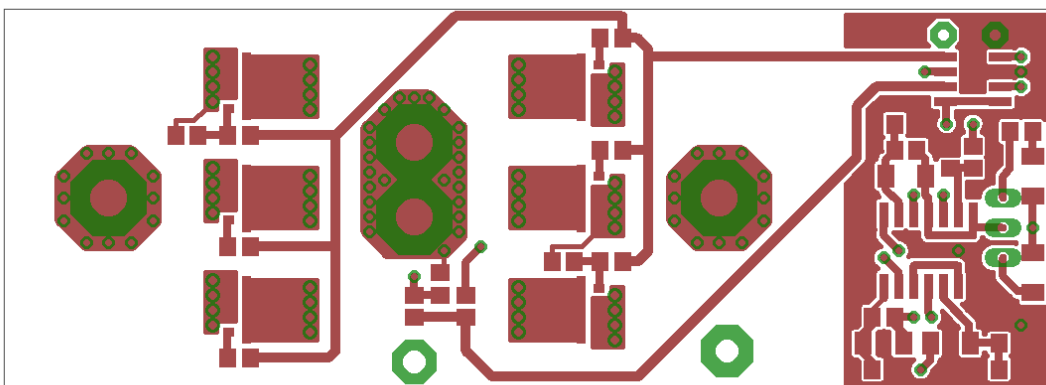
Obr. 5.5 Rozmístění součástek na desce plošných spojů - vrstva BOTTOM



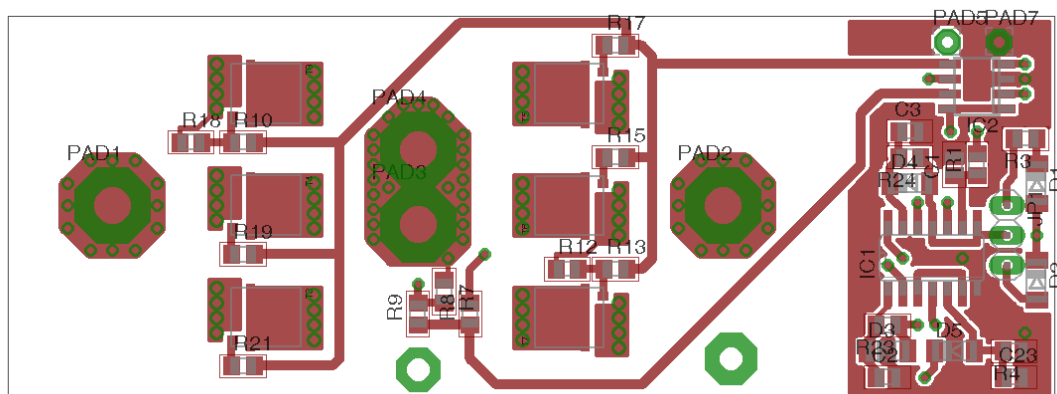
Obr. 5.6 Deska plošných spojů měniče - vrstva 15



Obr. 5.7 Deska plošných spojů měniče - vrstva 2



Obr. 5.8 Deska plošných spojů měniče - vrstva TOP



Obr. 5.9 Rozmístění součástek na desce plošných spojů - vrstva TOP

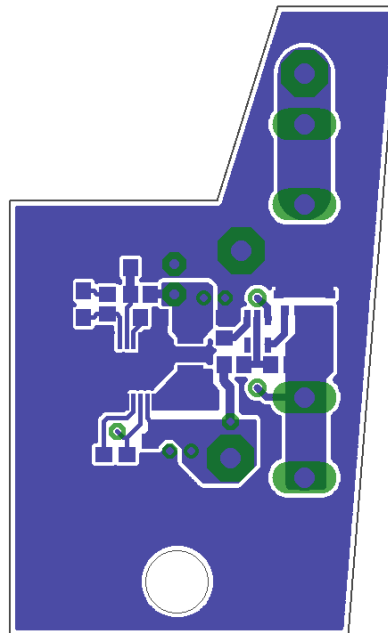
Tab. 5.1 Seznam součástek na DPS měniče včetně řízení

Součástka	Hodnota	Pouzdro
C1-C3	470 pF	0805
C4-C12, C17-C20, C31, C33-C36	10 μ F/25 V	1210
C22, C38, C39	100 nF	0805
C23-C24	10 nF	0805
C37	330 nF	0805
D1-D4	Bat43	SOD80C
D5	12 V	SOD80C
IC1	74HCT14	S014
IC2	MCP14E4-E/SN	S008
IC3	78L05	SOT89
JP1	47 k Ω	-
R1, R4	1 k Ω	0805
R3	56 k Ω	0805
R7	10 k Ω	0805
R8-10, R13, R15, R17, R19, R21,	2 Ω	0805
R12, R18	15 k Ω	0805
R23	510 Ω	0805
R24	430 Ω	0805
T1-T8	BSC009NE2LS5I	SuperS08

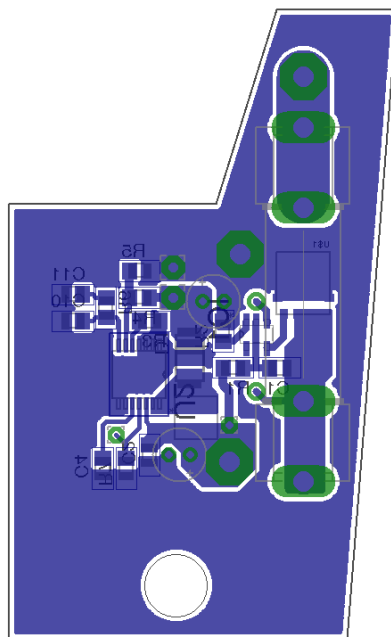
5.2.2 Pomocná deska

Jedná se jednostrannou desku, vyrobenou ve školní dílně. Obsahuje tavnou pojistku, integrovaný obvod zajišťující BMS a zvyšující měnič. Schéma této desky je uvedeno na Obr. 5.1. Tato deska bohužel nemohla být osazena a vyzkoušena, protože dodavatel nebyl schopen součástky dodat.

Návrh desky je uveden na Obr. 5.10 Pomocná deska plošných spojů Obr. 5.10. Tvar desky je uzpůsoben pro umístění v držadle páječky. Po celé desce je rozlita měď spojená se zemí (GND). Rozmístění součástek na stejném plošném spoji je na Obr. 5.11.



Obr. 5.10 Pomocná deska plošných spojů



Obr. 5.11 Rozmístění součástek na pomocné desce plošných spojů

Tab. 5.2 Seznam součástek pro pomocnou DPS

Součástka	Hodnota	Pouzdro
C1, C11	100 nF	0805
C2	220 nF	0805
C4	22 nF	0805
C6, C7	22 μ F	EU2-5
C10	1,8 nF	0805
D1	SK14	DO-214AC
F1	20 A	6,3x35
IC1	AP9101C	SOT95
L	ASPI4030S	-
R1	330 Ω	0805
R2	2,7 k Ω	0805
R3	59 k Ω	0805
R4	113 k Ω	0805
R5	10 k Ω	0805
R6	2 k Ω	0805
R7	20 k Ω	0805
U2	TPS55340PWP	SOP65

5.3 Celkové zařízení



Obr. 5.12 Fotografie celkové bateriově napájené páječky

Na Obr. 5.12 je uvedena fotografie postavené bateriově napájené páječky. Z klasické transformátorové páječky se využila pouze plastová krabice, pájecí kleštiny včetně pájecí smyčky a tlačítko. V horní části páječky je umístěn spínaný měnič, pod měničem je umístěna baterie, která je tvořena ze čtyř kusů akumulátoru Li-ion velikosti 18650. Napravo od baterií je umístěn potenciometr, kterým se mění střída a tím i výstupní proud. Regulovatelnost je od 0 A do cca 80 A. Za klasickým tlačítkem je umístěn mikrospínač na zapnutí celé páječky. V držadle páječky je umístěn pomocný plošný spoj. Tento plošný spoj, jak je uvedeno výše, nebylo možné zprovoznit.

5.4 Oživení měniče

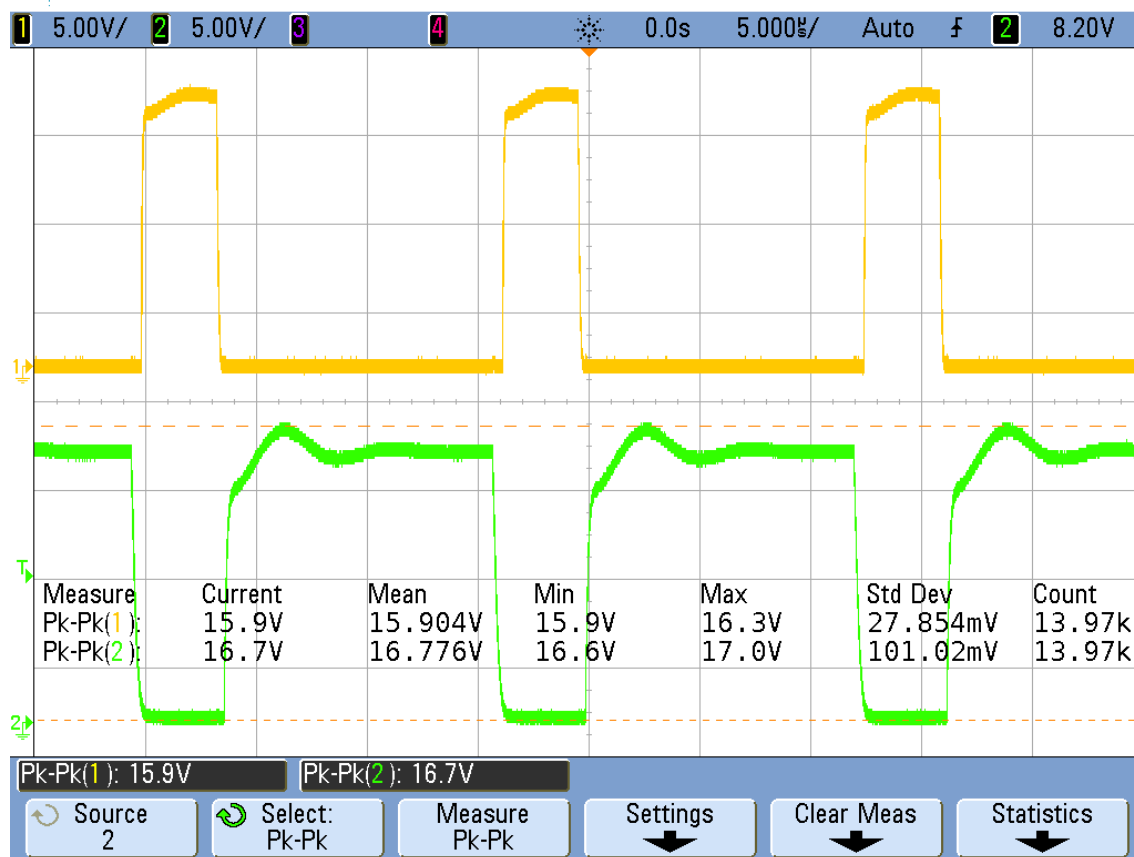
Nejprve bylo nutné oživit řídicí obvody tak, že Schmittův klopný obvod byl připojen na laboratorní zdroj s omezeným proudem. Jelikož horní hysterezní komparační úroveň a také dolní hysterezní komparační úroveň KO má přesnost okolo 40%, bylo nutné vypočítané hodnoty odporů významným způsobem změnit. Vzhledem k pomalejšímu vybíjení hradlových kapacit spodních tranzistorů bylo nutné změnit i časy odskoků.

Po oživení řídicích obvodů se mohlo přejít k oživení celého měniče. Nejprve z laboratorního zdroje s omezením proudu. Byl kontrolován proud měničem, napětí na tranzistorech na dráze Drain – Source a teplota pájecího oka. V této části bylo také přistoupeno ke snížení proudu a tím pádem celého řízení, viz kapitola 5.6.

Po této operaci se mohla páječka oživit již s napájením z baterií. BMS obvody, jak je uvedeno výše, nemohly být oživeny.

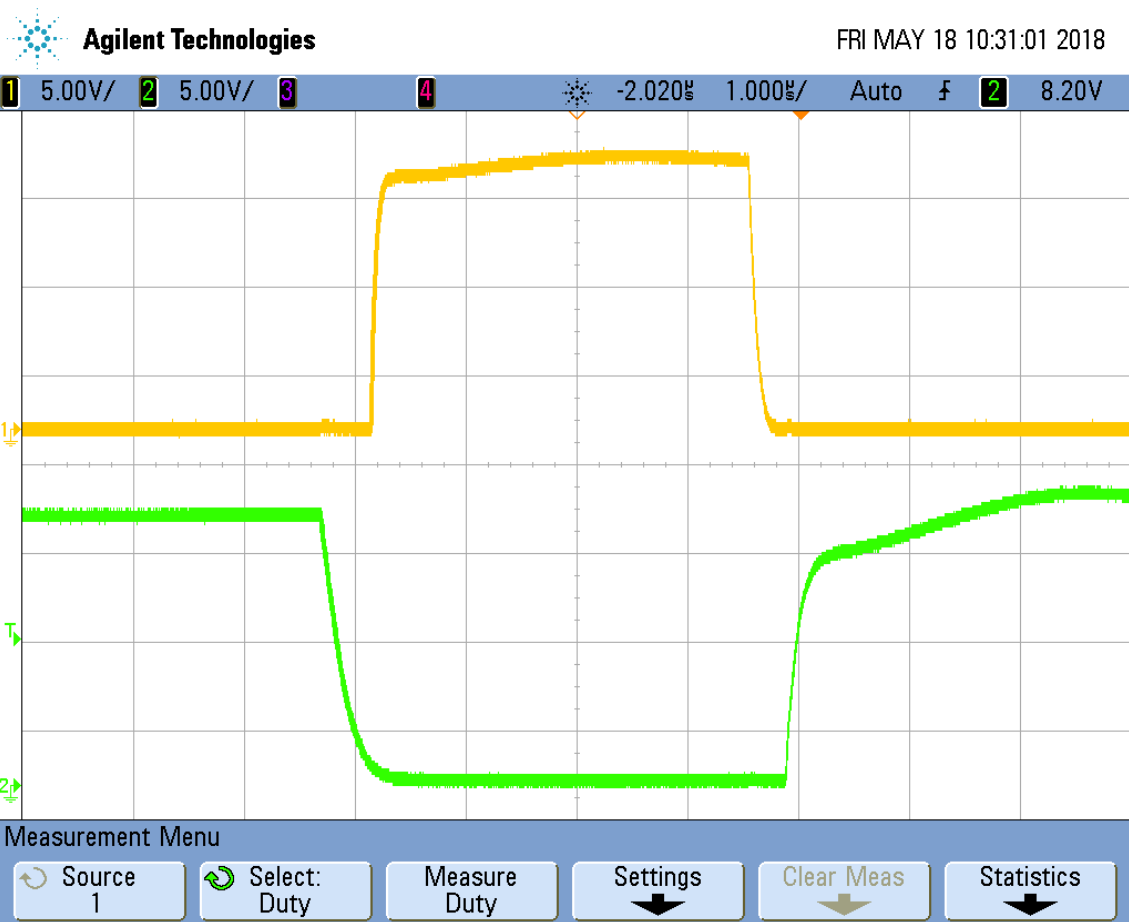
5.5 Naměřené průběhy

Po úspěšném oživení měniče byly zaznamenány různé osciloskopické průběhy. Níže uvedené obrázky jsou již po změně proudu zátěží na přibližně 80A, jak bude uvedeno níže.



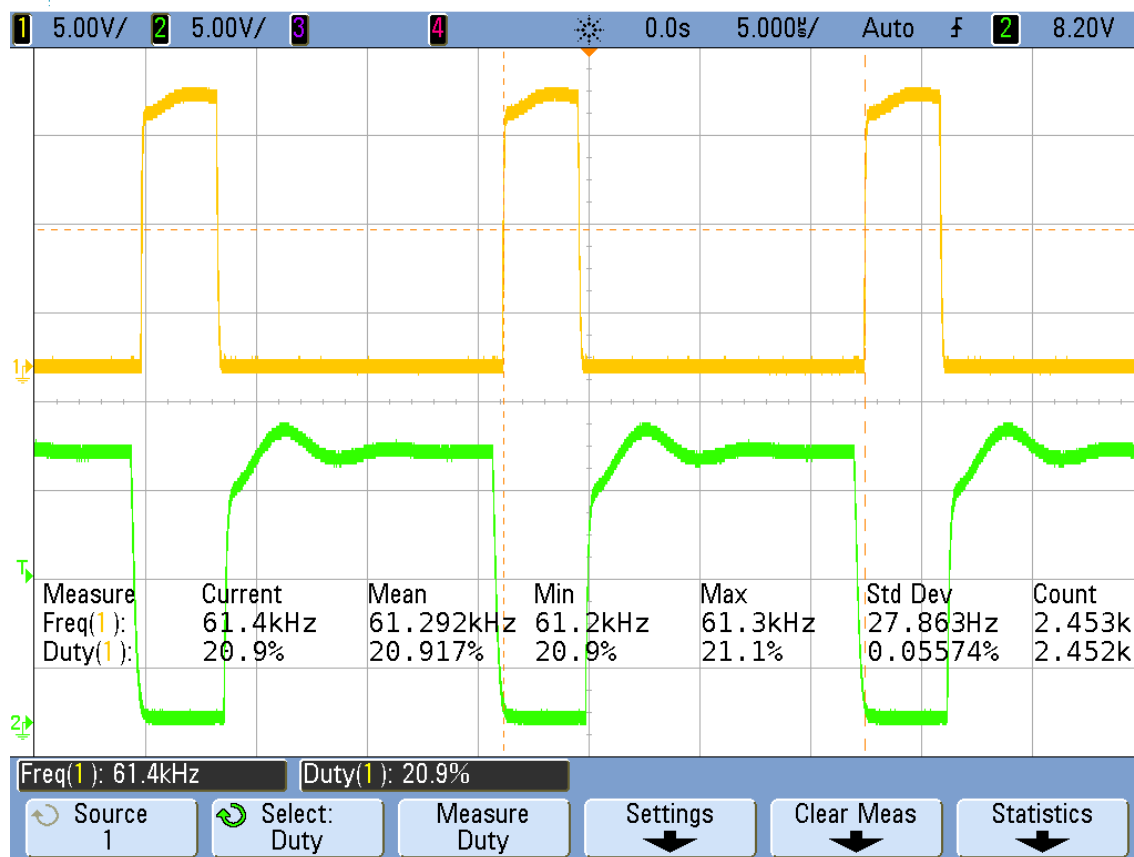
Obr. 5.13: Napětí na řídicích elektrodách

Na Obr. 5.13 je průběh napětí na řídicích elektrodách. Žlutý průběh je napětí na Gate na horních tranzistorech, zelený průběh je napětí na Gate na spodních tranzistorech. Žlutý průběh má hodnotu napětí špička-špička 15,9 V, zelený 16,7 V. Tranzistory jsou tedy buzeny dostatečným napětím.



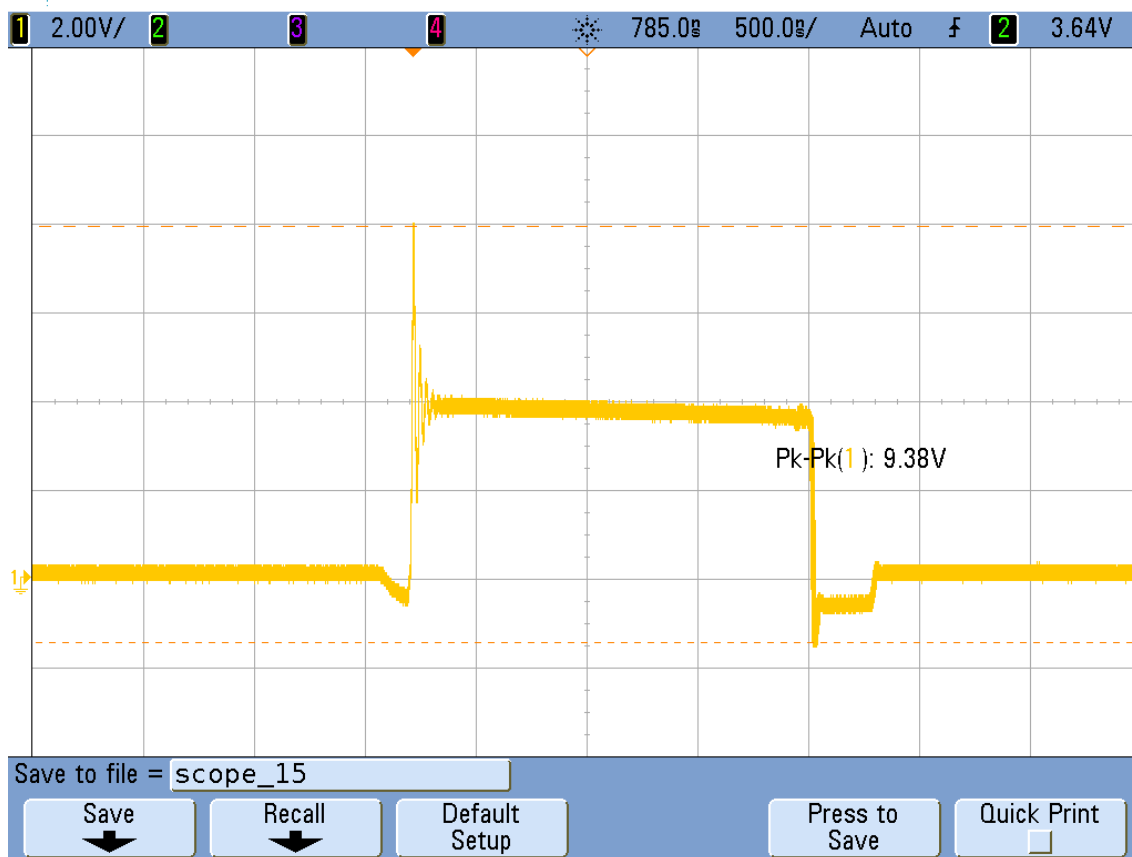
Obr. 5.14: Napětí na řídicích elektrodách – detail

Na výše uvedeném obrázku je stejný průběh napětí, ovšem v detailu. Lze krásně vidět odskok mezi těmito signály.



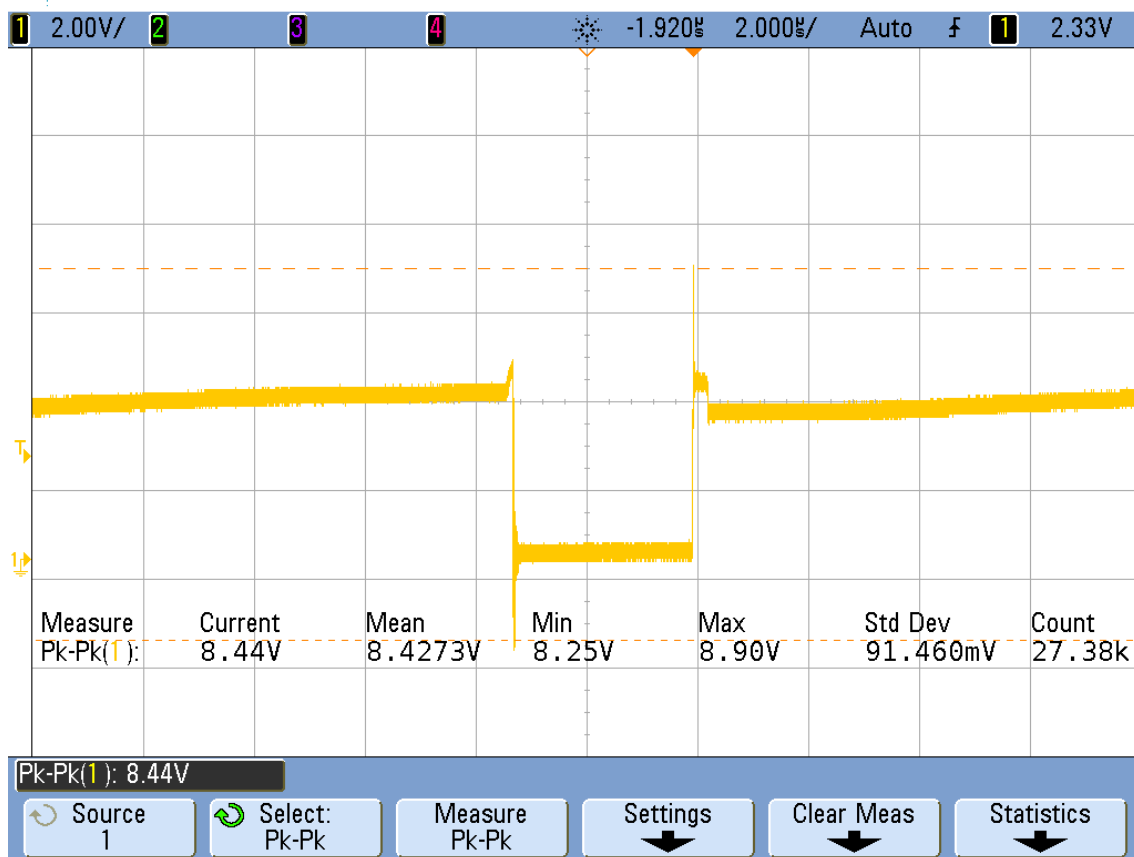
Obr. 5.15: Budící signály tranzistorů - včetně frekvence a střídý

Na Obr. 5.15 jsou uvedeny budící signály tranzistorů, včetně zobrazené frekvence a střídý. Průběhy jsou při proudu zátěží přibližně 80 A, potenciometr je vytočen do maximální polohy. Frekvence je zde 61,4 kHz, což je více, než frekvence požadovaná, nicméně to až tolik nevádí. Sice se tím zvýší ztráty přepínací a ztráty na substrátových diodách na „nulových“ tranzistorech, ale vzhledem k nižšímu proudu zátěží to nevádí. Spínací frekvence bohužel také závisí na poloze potenciometru, kdy, pokud je vytočen do minimální polohy, frekvence klesá až ke 35 kHz. To ale také nevádí vzhledem k velkému nízkému proudu, který při této frekvenci teče pájecím okem. Střída je zde 20,9 %.



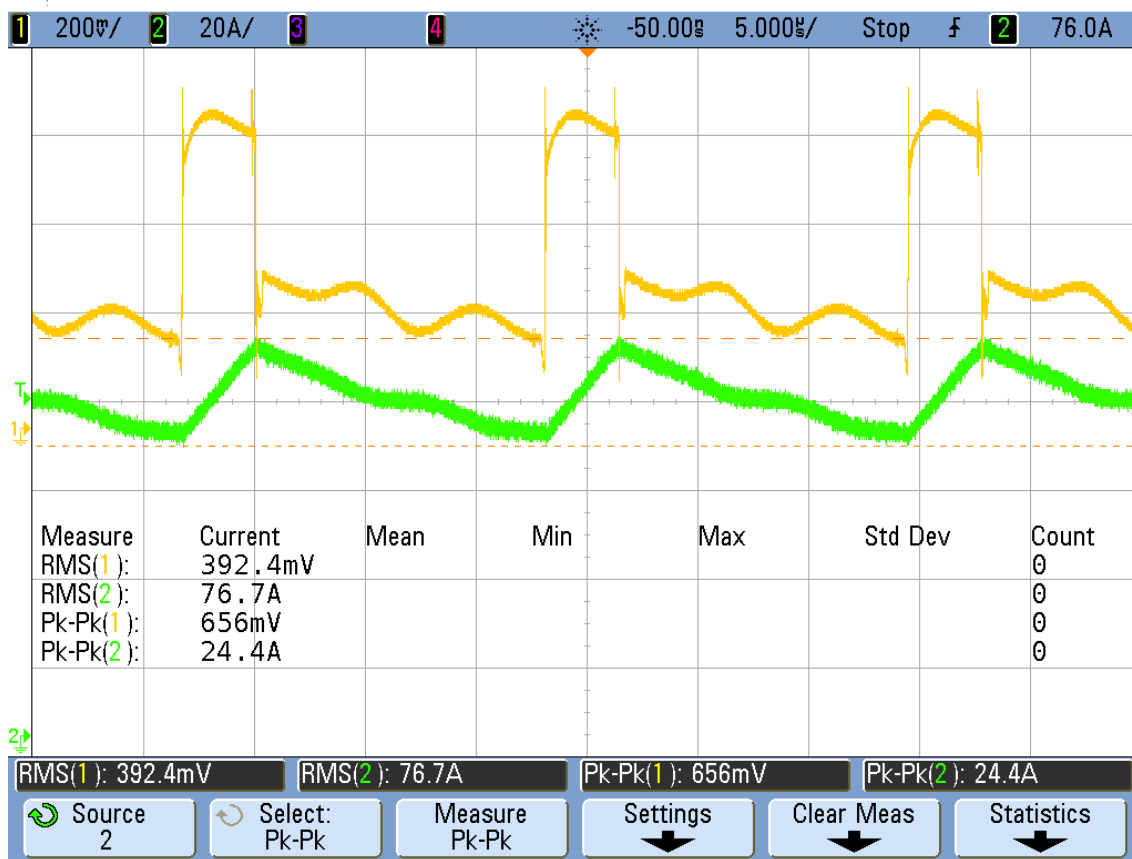
Obr. 5.16: Napětí Drain - Source spodních tranzistorů

Na Obr. 5.16 vidíme průběh napětí na dráze Drain - Source spodních tranzistorů při zatížení. Napěťový překmit špička - špička má hodnotu 9,38 V. Tranzistor je na 25 V, rezerva je tedy více než dostatečná.



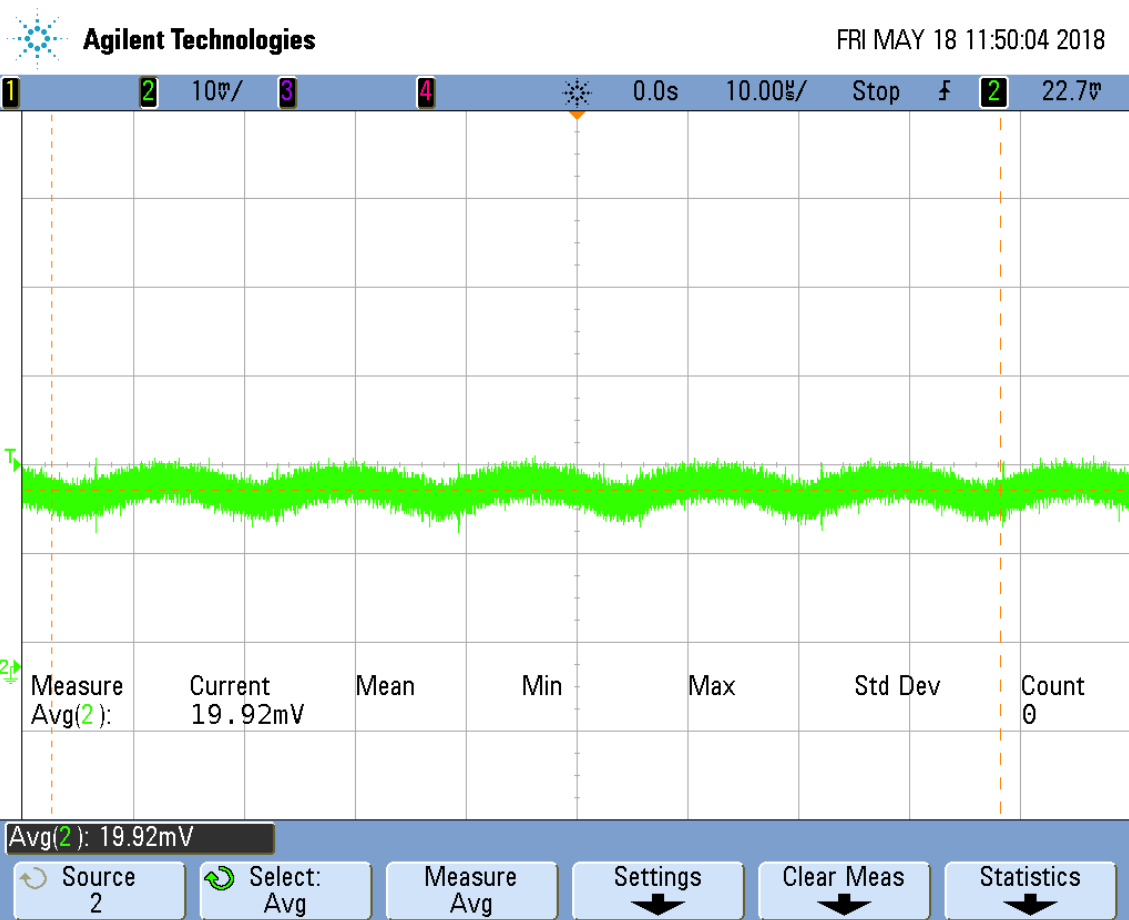
Obr. 5.17: Napětí Drain - Source horních tranzistorů

Na Obr. 5.17 je vyobrazeno napětí Drain - Source horních tranzistorů. Překmit zde dosahuje hodnoty 8,44 V, i zde je veliká rezerva.



Obr. 5.18: Napětí a proud na výstupu

Na Obr. 5.18 vidíme napětí (první kanál – žlutý průběh) a proud (druhý kanál – zelený průběh) zátěží při maximálním zatížení. Efektivní hodnota napětí je 392,4 mV, efektivní hodnota proudu 76,7 A. Zvlnění proudu má hodnotu 24,4 A, tedy téměř 32 %. Činný výkon tedy je o něco více než 30 W. Důvod proč je tento výkon nižší, než na který je měnič navržen je uveden v 5.6.



Obr. 5.19: Průběh proudu tekoucí z baterie

Na uvedeném obrázku je zachycen průběh napětí, reprezentující proud tekoucí z baterie. Proudová sonda má rozsah 5 A/dílek. Střední hodnota proudu tedy je 9,96 A. Z jednoho akumulátoru tedy teče 2,49 A, což je méně než 1,1C.

5.6 Výsledky konstrukce

Navržený a vyrobený měnič fungoval zcela bez problémů. Nicméně původní úvaha, že odpor pájecí smyčky je přibližně dvojnásobný, než odpor původního měděného oka byla chybná. Z Obr. 5.18 vyplývá, že odpor smyčky je:

$$R_z = \frac{U_z}{I_z} = \frac{0,3924}{76,7} = 5,116 \cdot 10^{-3} = 5,116 \text{ m}\Omega \quad (5.1)$$

Odpor smyčky je tedy téměř 4,3x vyšší než odpor původního měděného hrotu. Z tohoto důvodu nebylo možné spolu s navrhovaným řízením dosáhnout maximálního proudu zátěží. Po úpravě řízení (musela být zvětšena střída, a tím i

výstupní napětí) měnič dodával do oka proud o přibližné hodnotě 120 A. Při tomto proudu se ovšem pájecí smyčka rozžhavlala do červeného žáru, a střída, a tím i proud, musely být zmenšeny, aby nedošlo ke zničení oka. Po experimentování s proudem tekoucím do zátěže byl vybrán jako nejvhodnější proud okolo 80 A. Na tento proud bylo upraveno i řízení. Úprava proudu je v podstatě velice výhodná, protože se snižují ztráty v tranzistorech způsobené průchodem proudu. Také plošný spoj nebude tolik namáhaný, jako v původně zamýšlené konstrukci.

Nevýhodou ve snížení proudu je zvětšení času potřebného k nahřátí oka na takovou teplotu, aby roztavila cínovou pájku. V této verzi zabere zahřátí oka z pokojové teploty na teplotu tavení cínové pájky přibližně šest sekund.

Vzhledem k tomu, že se neměří proud tekoucí pájecím očkem, je nutné používat pouze pájecí smyčky určené k původní trafopájce typu SG109-100. Náhradní pájecí smyčka má kódové označení 06530016, případně 06530065.

Podpěťová ochrana řídicích obvodů funguje korektně, zabraní spínání tranzistorů při poklesu napájecího napětí pod 13,3 V.

Střední hodnota proudu tekoucí z baterie je 9,96 A. To znamená, že pokud uvažujeme kapacitu celé baterie 8 Ah, (nominální kapacita celé baterie je 9,2 Ah, nicméně tato hodnota je uvedena při vybíjení do napětí 2,5 V – vzhledem k činnosti BMS odpojujeme baterii při napětí 3,2 V, přijdeme tedy o část kapacity, ale s pozitivním vlivem na zvětšení životnosti baterie) baterie se vybije přibližně za 48 minut. Tento čas ovšem předpokládá, že bude páječka po celou dobu 48 minut zapnutá. Při uvažování střídání používání 40% (tuto střídání si v podstatě uživatel páječky určuje sám četností spínání tlačítka) dostáváme celkovou dobu použitelnosti 120 minut, tedy plné dvě hodiny.

Na druhou stranu, páječka má i nějaké nevýhody, z nichž největší je v blízkosti umístění plošného spoje s měničem k pájecím kleštinám a tím i k pájecí smyčce. Tím, jak se pájecí oko zahřívá vlivem průchodu proudu, dochází ke chlazení tohoto oka do pájecích kleštin, přívodu k pájecím kleštinám, a tím také do plošného spoje. DPS se tedy až tolik nezahřívá vlivem vlastních ztrát v měniči, ale vlivem blízkosti oka. Další nevýhoda je určena samotnými řídicími obvody. Pokud si uživatel na začátku pájení nastaví pájecí proud, který mu vyhovuje, vlivem vybíjení baterií se pájecí proud snižuje, a je tedy nutné proud dále upravovat.

Druhá, pomocná deska, se bohužel nemohla prakticky vyzkoušet z důvodu nedodání součástek ze strany dodavatele. Na této desce se ovšem nepředpokládají potíže s oživením.

6 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala modifikací transformátorové páječky na napájení bateriemi Li-ion.

Modifikace byla provedena na základě návrhů a výpočtů provedených v této práci, měnič je tedy navržen na výstupní napětí 0,6 V a proud 125 A. Transformátorová páječka byla úspěšně vyrobena, osazena součástkami a oživena. Tento typ transformátorové páječky využívá pájecí smyčku z neidentifikovatelného materiálu, pravděpodobně na bázi niklu a železa. Po průchodu proudem o velikosti přibližně 120 A došlo k rozžhavení pájecí smyčky do červeného žáru, proud musel být tedy úmyslně snížen, aby nedošlo k poškození smyčky. Po sérii měření byl vybrán nejvhodnější proud měniče, a to 80 A. Došlo tedy ke snížení výkonu měniče na hodnotu přibližně 30 W.

Tato změna proudu směrem dolů je velice výhodná. Jednak z důvodu nižších ztrát v tranzistorech vlivem průchodu proudem, jednak nebude deska plošných spojů tolik namáhána. Měnič je umístěn na profesionálně vyrobené čtyřvrstvé desce plošných spojů s plátováním mědi 70 μm .

Změna proudu má i negativní stránky, a to především delší dobu nahřátí hrotu. V našem případě trvá nahřátí z pokojové teploty na teplotu tavení cínové pájky přibližně šest sekund.

Největší nevýhoda této modifikace je umístění měniče. Jeho pozice blízko pájecím kleštinám je výhodná, protože není nutné tahat vodiče o poměrně velkém průřezu na delší vzdálenost. Toto uspořádání je ovšem velmi nevýhodné z hlediska chlazení. Pájecí oko se v podstatě chladí do kleštin, do přívodního vodiče a následně do celého měniče. Měnič se vlivem tohoto přestupu tepla zahřívá mnohem více než vlastním provozem.

I přes tuto a další nevýhody popsané v práci se jedná o velice zajímavé technické řešení, které má široké možnosti využití.

Literatura

- [1] Doc. Dr. Ing. PATOČKA, Miroslav. Vybrané statě z výkonové elektroniky: Svazek II. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005.
- [2] Datasheet BSC010NE2LSATMA1 [online]. [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BSC010NE2LS-DS-v02_02-en.pdf?fileId=db3a304326dfb1300126fb3d176a3f1b
- [3] Doc. Dr. Ing. PATOČKA, Miroslav. Vybrané statě z výkonové elektroniky: Svazek I. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005.
- [4] Doc. Ing. VOREL Ph.D., Pavel, Ing PROCHÁZKA, Petr . Řídicí členy v elektrických pohonech. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009.
- [5] Datasheet 74HC14, 74HCT14 — Hex inverting Schmitt trigger [online]. [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: https://assets.nexperia.com/documents/datasheet/74HC_HCT14.pdf
- [6] Datasheet AP9101C - SINGLE CHIP SOLUTION FOR 1-CELL Li+ BATTERY PACK [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/AP9101C.pdf>
- [7] Datasheet TPS55340 Integrated 5-A Wide Input Range Boost/SEPIC/Flyback DC-DC Regulator [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps55340.pdf>

Seznam symbolů, veličin a zkratek

U_{0_ef} [V]	Efektivní napětí naprázdno páječky
U_{0_max} [V]	Napětí v amplitudě naprázdno páječky
U_{z_ef} [V]	Efektivní napětí při zatížení páječky
U_{z_max} [V]	Napětí v amplitudě při zatížení páječky
I_{z_max} [V]	Proud v amplitudě při zatížení páječky
U_I [V]	Napětí reprezentující procházející proud
k [A/V]	Měřící rozsah proudové sondy
I_{z_ef} [A]	Efektivní proud při zatížení páječky
R_{z_20} [Ω]	Odpor pájecího oka při 20°C
I_z [A]	Proud zátěží
U_z [V]	Napětí na zátěži
L [H]	Indukčnost
X_L [Ω]	Reaktance proudovodné smyčky
U_d [V]	Napětí v meziobvodu
S_n [-]	Jmenovitá střída
I_{Cmax} [A]	Maximální proud horním tranzistorem
I_{Cstr} [A]	Střední proud horním tranzistorem
I_{Cef} [A]	Efektivní proud horním tranzistorem
I_{C0max} [A]	Maximální proud spodním tranzistorem
I_{C0str} [A]	Střední proud spodním tranzistorem
I_{C0ef} [A]	Efektivní proud spodním tranzistorem
I_D [A]	Proud tranzistorem
$I_{D,pulse}$ [A]	Maximální proud tranzistorem
$P_{Cztr_přep}$ [W]	Přepínací ztráty na horním tranzistoru
P_{Cztr_ved} [W]	Ztráty vedením na horním tranzistoru
R_{DSon} [Ω]	Odpor tranzistoru v sepnutém stavu
P_{Cztr_celk} [W]	Celkové ztráty v horním tranzistoru
$P_{C0ztr_přep}$ [W]	Přepínací ztráty na spodním tranzistoru
P_{C0ztr_ved} [W]	Ztráty vedením na spodním tranzistoru
P_{C0ztr_D} [W]	Ztráty průchodem proudu přes substrátovou diodou
t_{odskok} [s]	Doba odskoku
U_{SD} [V]	Propustné napětí na substrátové diodě
U_{DSmax} [V]	Maximální napětí tranzistoru na dráze Drain-Source
ΔI_{max} [A]	Maximální zvlnění proudu
I_{kap} [A]	Efektivní proud tekoucí kapacitorem
U_{DOC} [V]	Napětí detekce pro nadproud pro BMS

I_{vyb_max} [A]	Maximální vybíjecí proud baterie
U_H [V]	Hysterezní napětí
I_{nab} [A]	Nabíjecí proud
I_{vyb} [A]	Vybíjecí proud
t_{nab} [s]	Doba nabíjení kondenzátoru
t_{vyb} [s]	Doba vybíjení kondenzátoru
u_c [V]	Okamžité napětí na kondenzátoru
τ [s]	Časová konstanta
R_{thJA} [K/W]	Tepelný odpor pouzdra tranzistoru
t_{on} [ns]	Zapínací doba tranzistoru
t_{off} [ns]	Vypínací doba tranzistoru
GND	Ground
IC	Integrated Circuit – integrovaný obvod
Li-ion	Lithium-iontová baterie
BMS	Battery management system
PWM	Pulse width modulation (pulsně šířková modulace)
SMD	Surface mount device
KO	Klopný obvod

Přílohy

Příloha A: Schéma zapojení desky výkonového měniče

Příloha A: Schéma zapojení desky výkonového měniče

