



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

KONTAKTOVAČKA PRO LITHIOVÉ BATERIE

WELDER FOR LITHIUM BATTERIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Martinček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

Student: Martin Martinček

ID: 220847

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Kontaktovačka pro lithiové baterie

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte problematiku kontaktování lithiových baterií, zejména velikosti 18650, s ohledem na přestup tepla. Navrhněte koncept kontaktovačky pro lithiové články. Kontaktovačka by měla umožnit regulaci proudu. Zařízení zkonstruujte, zdokumentujte a proveďte příslušná měření a nastavení. Kontaktovačku prakticky otestujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího závěrečné práce.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 2.6.2022

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Táto bakalárska práca sa zaoberá zložením lítiových batérií, technológiou spájania lítiových článkov a návrhom zariadenia uspôsobeného ku kontaktovaniu cylindrického článku veľkosti 18650. V prvej časti je diskutovaná konštrukcia, základné materiály lítiových batérií a ich použitie. V ďalšej časti je uvedený prehľad niekoľkých metód spájania článkov a ich vzájomné porovnanie. Posledná časť sa zaoberá jednotlivými časťami návrhu a konštrukcie kontaktovacieho zariadenia, pracujúcim na princípe bodového odporového zvarovania.

Kľúčové slová

Batéria, Lítiový článok, Li-ion článok, Odporové zvarovanie, Bodové zvarovanie, Kontaktovanie článkov

Abstract

This Bachelor's Thesis deals with the composition of lithium batteries, lithium cell joining, and the design of a device customised for contacting an 18650-size cylindrical cell. The first part discusses the construction, basic materials of the lithium batteries and their applications. In the next section, an overview of several methods of cell contacting and their comparison with each other is presented. The last section discusses different parts of the design and construction of the device, working on the principle of spot resistance welding.

Keywords

Battery, Lithium cell, Li-ion cell, Resistance welding, Spot welding, Cell contacting

Bibliografická citácia

MARTINČEK, Martin. *Kontaktovačka pro lithiové baterie* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142486>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektrotechnologie. Vedoucí práce Petr Vyroubal.

Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko študenta: Martin Martinček
VUT ID študenta: 220847
Typ práce: Bakalárska práca
Akademický rok: 2021/2022
Téma záverečnej práce: Zváračka pre lítiové batérie

Prehlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, hlavne som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa: 23.05. 2022

podpis autora

Pod'akovanie

Chcel by som poďakovať najmä svojmu vedúcemu bakalárskej práce doc. Ing. Petrovi Vyroubalovi, Ph.D. za trpezlivosť a efektívnu metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc pri písaní mojej záverečnej práce. Ďalej by som rád poďakoval Ing. Radkovi Tománkovi a Ing. Petrovi Procházkovi, Ph.D. za cenné rady a konzultácie pri riešení problémov v mojej bakalárskej práci.

V Brne dňa: 23.05. 2022

podpis autora

Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV	8
ZOZNAM TABULIEK	10
1. ÚVOD.....	11
2. LÍTIUM IÓNOVÉ BATÉRIE.....	12
2.1 ZLOŽENIE A POUŽÍVANÉ MATERIÁLY	12
2.2 POUŽITIE LÍTIOVÝCH BATÉRIÍ.....	14
2.3 TYPY A VEĽKOSTI BEŽNE POUŽÍVANÝCH ČLÁNKOV	15
2.4 ČLÁNOK VEĽKOSTI 18650	17
3. SPÁJANIE ČLÁNKOV	18
3.1 HLAVNÉ PROBLÉMY KONTAKTOVANIA ČLÁNKOV	18
3.2 TYPY POUŽÍVANÝCH SPOJOV	18
3.3 ZHRNUTIE VYŠŠIE PREDSTAVENÝCH METÓD SPÁJANIA.....	23
4. CIELE BAKALÁRSKEJ PRÁCE.....	25
5. NÁVRH KONCEPTU BODOVEJ ZVÁRAČKY	26
5.1 EMC FILTER A POMOCNÝ ZDROJ	26
5.2 TYRISTOROVÝ REGULÁTOR.....	27
5.3 BUDIACE OBVODY	29
5.4 VÝKONOVÝ TRANSFORMÁTOR	31
5.5 MERANIE PRÚDU	32
5.6 RIADENIE A ALGORITMUS.....	34
5.7 OVLÁDACIE ROZHRANIE.....	36
5.8 VÝSTUPNÉ ELEKTRÓDY	37
5.9 KRYCIE PRVKY A TEPLTNÉ POMERY ZARIADENIA	38
5.10 CENOVÁ KALKULÁCIA VÝROBY PROTOTYPU	42
6. VÝSLEDKY A TESTOVANIE.....	44
7. ZÁVER.....	49
LITERATÚRA.....	51
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	56
ZOZNAM PRÍLOH.....	58

ZOZNAM OBRÁZKOV

2.1	Interkalácia iónov lítia v štruktúre grafitu, prebiehajúca na kladnej elektróde Li-ion článku [4].....	13
2.2	Interkalácia iónov lítia na anóde z titán lítium oxidu v Li-ion článku [4]	13
2.3	Chemické procesy pri nabíjacom a vybíjacom cykle v Li-ion batérii [8].....	14
2.4	Cylindrické články používané v elektrických vozidlách od spoločnosti Tesla [10].....	15
2.5	Rôzne typy konštrukcie článkov: a) cylindrický, b) prizmatický a c) polymérový článok [11].....	15
2.6	Gombíkový článok [17]	16
2.7	Zobrazenie bežného článku veľkosti 18650: a) technický náčrt [19] a b) reálna podoba vyrobeného článku [20].....	17
3.1	Rôzne postavenie elektród pri bodovom odporovom zváraní [23].....	19
3.2	Elektrické odpory a prúdy na rozhraní dvoch zváraných materiálov pri odporovom zváraní [21] ...	19
3.3	Poloautomatická bodová odporová zväračka ovládaná operátorom pri bodovaní článkov veľkosti 18650 [26]	20
3.4	Bodové zváranie článku laserovou metódou: a) laserová hlavica [27] a b) medený a oceľový kontakt napojený na cylindrických článkoch [28].....	21
3.5	Ultrazvukové zváranie a) na cylindrickom článku a b) na vonkajšom kontakte článku [21]	21
3.6	Ultrazvukové zváranie a) niekoľkých medených fólií dokopy [29] a b) medeného kontaktu na vrchný kontakt cylindrického článku [30].....	22
3.7	Mechanické spoje na cylindrických článkoch [22]	22
3.8	Grafické znázornenie teplotného zaťaženia pri a) odporovom, b) laserovom a c) ultrazvukovom zváraní na článku veľkosti 2660 tesne po zváraní a šesť sekúnd po skončení zvárania [21]	23
3.9	Poloautomatická priemyselná ultrazvuková zväračka, pri spájaní niekoľkých medených vodičov [31]	24
3.10	Priemyselne používané poloautomatické stroje: a) laserová zväračka [32] a b) odporová bodová zväračka [33]	24
5.1	Bloková schéma návrhu bodovej zväračky	26
5.2	Schéma vstupného filtra s tavnou poistkou	27
5.3	Schéma zapojenia pomocného zdroja	27
5.4	Priebeh napätia a prúdu na výstupe a vstupe tyristorového regulátora pri RL záťaži [42].....	28
5.5	Antiparalelné zapojenie dvoch tyristorov a zapojenie triaku.....	29
5.6	Doporučené zapojenie galvanicky oddeleného meniča s impulzným transformátorom [42]	30
5.7	Schéma budiaceho obvodu použitého v návrhu zariadenia, na báze priepustného meniča	31
5.8	Upravený výkonový transformátor.....	32
5.9	Použitý prúdový snímač HAT 1000-S [45].....	33
5.10	Obvod prevodníka napät'ovej úrovne prúdového snímača	34
5.11	Modul mikrokontroléra Arduino Nano [35]	34
5.12	Blokové schéma algoritmu korekcie prúdu	35
5.13	Ovládacie rozhranie, nastavenie nových parametrov	36
5.14	Komerčne dostupné pero pre bodovanie článkov [39]	37
5.15	Model navrhovaného krytu zariadenia, pohľad na oddelenú hornú a spodnú časť	38
5.16	Statická teplotná simulácia vo vnútri zariadenia, horný pohľad.....	39
5.17	Hotový prototyp bodovej zväračky pre lítiové batérie	40
5.18	Grafické zobrazenie periodického spínania výkonovej záťaže na komponentoch v teplotnej simulácii, 0=vypnuté, 1=zapnuté.....	40
5.19	Vývoj teplôt komponentov zariadenia počas časovo premenlivej teplotnej simulácie	41
6.1	Nastavenie pracovného prúdu na 200 A, pri dobe zvárania 12 cyklov, čiže 120 ms	45
6.2	Nastavenie pracovného prúdu na 900 A, pri dobe zvárania 12 cyklov, čiže 120 ms	45

6.3	Priebeh napätia na výstupe pri nastavení pracovného prúdu na 200 A	46
6.4	Detail na priebeh posledného pulzu pri nastavení pracovného prúdu na 200 A.....	46
6.5	Priebeh napätia na výstupe pri nastavení pracovného prúdu na 900 A	47
6.6	Nakontaktované články veľkosti 18650 pri rôznom nastavení pracovného prúdu, rovnakej doby zvárania: a) pri 900 A, b) pri 200 A	48

ZOZNAM TABULIEK

5.1	Priemerné dosiahnuté teploty na jednotlivých súčiastkach na konci kontaktovacieho procesu	41
5.2	Cenová kalkulácia jednotlivých komponentov	43

1. ÚVOD

Batérie sú dôležitou súčasťou moderných technológií a ich komplexné použitie vyžaduje neustále vyvíjanie nových technologických postupov, ktorými by sa k nim dalo pristupovať a pracovať s nimi.

Rôzne zariadenia musia plniť rozdielne funkcie pri rozličných výkonoch, v rozličných podmienkach a prostredí. To znamená, že každé zariadenie vyžaduje pre správnu funkčnosť špecifické parametre batérie, ktorá ho bude poháňať. Pre vytvorenie žiadaných parametrov batérie je potrebné spojiť niekoľko samostatných článkov. Medzi týmito článkami je nutné vytvoriť spojenie dostatočne kvalitné, aby spĺňalo požiadavky na bezproblémovú prevádzku batérie a nijak neovplyvnilo funkciu zariadenia, v ktorom sa batéria bude nachádzať.

Najdôležitejším cieľom v tejto práci je vysvetliť problematiku kontaktovania lítiových batérií a objasniť proces kontaktovania spolu so všetkými parametrami a problémami, ktoré sa v tomto procese môžu vyskytnúť. V nadväznosti na získané teoretické znalosti bolo skonštruované zariadenie, ktoré je schopné vykonávať proces kontaktovania v praxi. Zariadenie je cielené pre použitie na konkrétnej veľkosti a type komerčne dostupného článku lítiovej batérie.

Táto práca poskytuje prehľad materiálov používaných v lítiových batériách, všeobecný prehľad o používaných typoch spájania článkov a ich porovnanie medzi sebou. Okrem toho približuje princípy funkcie bodovej zväračky pre batérové články cylindrického typu. Na záver je predstavený kompletný návrh a konštrukcia riešenia bodovej zväračky.

2. LÍTIUM IÓNOVÉ BATÉRIE

V súčasnosti narastá potreba uschovať a znovu využiť veľké množstvo energie v najnižšom možnom objeme použitého úložiska, teda s vysokou energetickou hustotou. Technológia lítiových batérií sa ukazuje ako najlepšie riešenie pri momentálnom vedeckom a priemyselnom pokroku. Táto kapitola pojednáva o zložení lítium iónových článkov, obecné používaných veľkostiach Li-ion článkov a detailne o Li-ion článku veľkosti 18650.

2.1 Zloženie a používané materiály

Lítium iónové batérie pozostávajú z dvoch elektród, anódy a katódy, a elektrolytu medzi nimi. Elektrolyt v tomto prípade zastupujú soli lítia v organických rozpúšťadlách [1].

Anódou sa nazýva elektróda, ktorá sa oxiduje a pri vybíjaní uvoľňuje kladné ióny lítia do elektrolytu a záporné elektróny do vonkajšieho obvodu. Na katóde, ktorá prijíma elektróny z obvodu, vždy prebieha opačná, redukčná, reakcia, počas ktorej prijíma kladné ióny lítia. Pri procese nabíjania, elektródy zmenia svoje postavenie a ióny lítia sa pohybujú opačným smerom (Obrázok 2.1) [2].

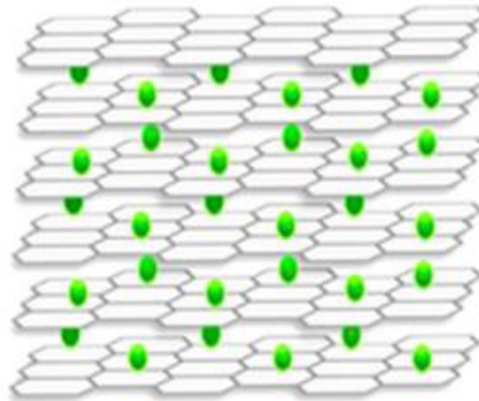
Pre účely výroby lítiových batérií je skúmané a vyvíjané veľké množstvo materiálov. Tieto materiály sú vyberané na základe ich vlastností a rozšírenia. Základnými parametrami, ktoré sa hodnotia, sú teoreticky a prakticky dosiahnuteľná kapacita a dostatočná energetická a výkonová hustota, to všetko pri zachovaní vhodnej ceny a dostupnosti použitých materiálov a technológií.

Anódové materiály sú vyvíjané s dôrazom na zabránenie vzniku dendritických štruktúr, ktoré lítium vytvára. Dendritickými štruktúrami sa nazývajú mikroskopické štruktúry, ktoré vznikajú na anóde pri nahromadení iónov lítia, ktoré anóda nie je schopná absorbovať [3]. Nežiaducim javom týchto štruktúr je zníženie kapacity znížením počtu atómov lítia, ktoré sa môžu podieľať na chemických reakciách pri vybíjaní. Najväčšie nebezpečenstvo vzniká v extrémnom prípade, kedy sú tieto štruktúry tak veľké, že sa dostávajú až k opačnej elektróde, kde pri priamom kontakte nastáva vnútorný skrat, ktorý vedie k prehriatiu a možnému požiaru batérie [3].

Použitie **grafitu a tvrdého uhlíka** v anódovej elektróde umožnilo komerčné sprístupnenie Li-ion batérie už pred dvadsiatimi rokmi, pričom sa tieto materiály používajú aj v dnešných výrobkoch. Grafit je zložený z mnohoplošných štruktúr uhlíka, grafénu. Samotný uhlík sa vyznačuje vysokou energetickou a výkonovou hustotou, relatívne nízkou cenou a dlhou dobou života v porovnaní s akýmkoľvek iným materiálom, v ktorom sa využíva interkalácia (vsunutie) ako mechanizmus uloženia atómov lítia [4].

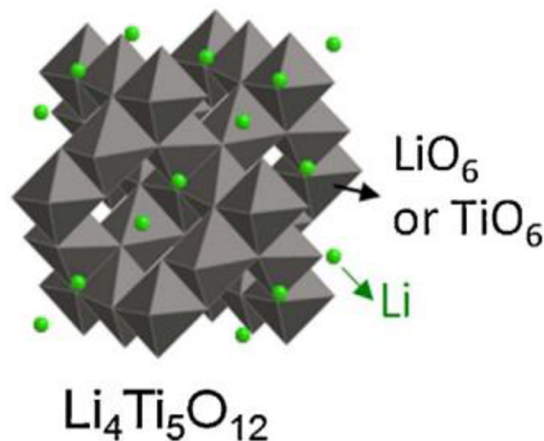
Medzi grafénové roviny sa pri nabíjaní interkaláciou ukladajú atómy lítia, týmto procesom môže grafit prijať až jeden atóm lítia na šesť atómov uhlíka. Vďaka plošnej

štruktúre je zabezpečená dobrá stabilita, elektrická vodivosť a relatívne ľahký presun iónov lítia.



Obrázok 2.1 Interkalácia iónov lítia v štruktúre grafitu, prebiehajúca na kladnej elektróde Li-ion článku [4]

Titán lítium oxid ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) je novší materiál pre anódovú elektródu, ktorý sa aj napriek vyššej cene úspešne používa vo výrobe a to pre svoju stabilitu, relatívne vysokú životnosť a objemovú kapacitu. Využíva podobný princíp interkalácie ako grafitová anóda, avšak poskytuje nižšie napätie jedného článku (2,4 V) a nižšiu kapacitu ako bežný Li-ion článok (2500 mAh pri 3,7 V) [5]. Napriek týmto nevýhodám je takýto článok ideálny pre použitie v aplikáciách, ktoré vyžadujú vysoký výstupný výkon a veľkú životnosť aj za cenu nižšej celkovej energie [4].

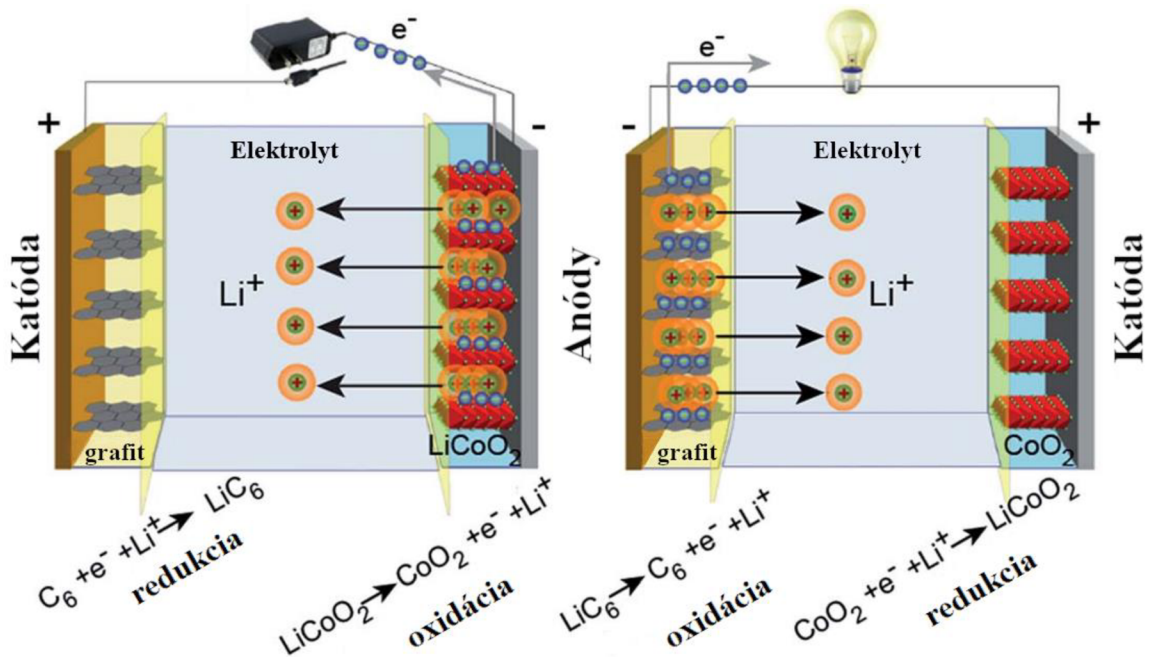


Obrázok 2.2 Interkalácia iónov lítia na anóde z titán lítium oxidu v Li-ion článku [4]

Katódy článku limitujú výkon článku, nakoľko sú schopné absorbovať menej iónov lítia ako anódy. Niektoré z najpoužívanejších materiálov pre výrobu interkalačných katód

sú lítium kobalt oxid (LiCoO_2), lítium mangán oxid (LiFePO_4), lítium železo fosfát (LiFePO_4), lítium nikel mangán kobalt oxid ($\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$) a lítium nikel mangán kobalt oxid ($\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$) [6].

Každý cylindrický článok obsahuje okrem elektród a elektrolytu aj ochranný obal, zátku a tesnenie. Všetky tieto prvky slúžia ako ochrana článku pred vonkajším prostredím a tiež ako ochrana používateľa pred nebezpečnými chemickými látkami v článku. Ako materiál pre výrobu ochranného obalu sa používa hliník, nehrdzavejúca oceľ alebo tenká oceľ s povrchom ošetreným vrstvou niklu. Zátku a tesnenie článku tvorí polypropylén [7].



Obrázok 2.3 Chemické procesy pri nabíjacom a vybíjacom cykle v Li-ion batérii [8]

2.2 Použitie lítiových batérií

Lítiové batérie sa osadzujú do všetkých najnovších zariadení, ktorých prevádzkové podmienky dovoľujú ich použitie. Nepoužívajú sa v aplikáciách, ktoré dosahujú nižšie alebo vyššie prevádzkové teploty, prípadne v aplikáciách, kde je ekonomicky výhodnejšie použiť inú technológiu uschovania energie. Postupne vytlačujú ostatné typy batérií vďaka svojej vysokej energetickej hustote a relatívne vysokej výkonovej hustote. Na rozdiel od iných typov batérií, Li-ion batérie vyžadujú vlastný ochranný obvod pre svoje nabíjanie a v prípade skladania viacerých článkov aj samostatný obvod pre vyrovnávanie napätí na každom z článkov [9].

V súčasnosti sú používané v ručnom náradí, osobných počítačoch, mobilných telefónoch a v iných zariadeniach, ktoré vyžadujú vyššiu kapacitu pri nižšom využiteľnom objeme. Najväčšie použitie momentálne predstavujú elektrické vozidlá,

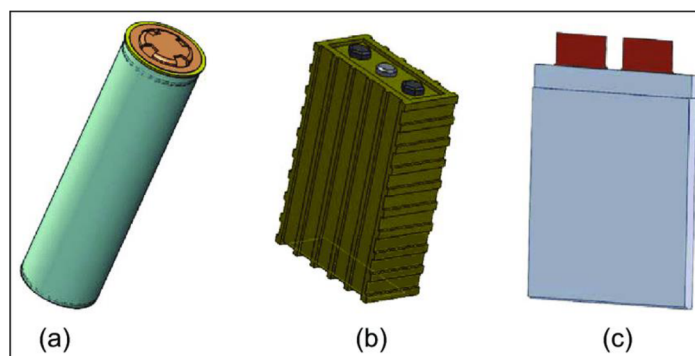
v ktorých je rozhodujúca práve energetická a výkonová hustota batérie kvôli výslednému dojazdu vozidla.



Obrázok 2.4 Cylindrické články používané v elektrických vozidlách od spoločnosti Tesla [10]

2.3 Typy a veľkosti bežne používaných článkov

Články sa bežne vyrábajú v rôznych veľkostiach, tvaroch a prevedeniach. Finálna konfigurácia používaného článku sa volí na základe ceny, kapacity, bezpečnosti, veľkosti článku a efektivity uloženia, prípadne podľa špecifických požiadaviek zákazníka.



Obrázok 2.5 Rôzne typy konštrukcie článkov: a) cylindrický, b) prizmatický a c) polymérový článok [11]

Cylindrické články (Obrázok 2.5 a)) sú najbežnejším typom článkov používaných vo viacčlánkových batériách pre svoju relatívne vysokú kapacitu a výkonové zaťaženie jedného článku [12] [13].

Články majú valcovitý tvar, vo vnútri sú zrolované jednotlivé vrstvy článku. Kladný pól článku je umiestnený na opačnej strane ako záporný, kladný pól je odizolovaný gumovým tesnením od vonkajšieho obalu. Na mnohých článkoch je kontakt kladného pólu vyvýšený a na boku čiastočne perforovaný. Pod vyvýšením je umiestnený mechanizmus, ktorý nahrádza poistný ventil, v prípade nahromadenia plynov v článku umožní ich ľahký únik z článku cez perforácie na kladnom vývode a zabráni explózii [1].

Záporný pól je obvykle pripojený na kovový obal článku alebo je samostatne vytvorený na spodnej strane spolu s ochranným obvodom článku.

Prizmatické články (Obrázok 2.5 b)) sa vyznačujú hlavne hranatým tvarom svojho vonkajšieho obalu, kladný aj záporný pól majú umiestnený na vrchnej strane článku a na vrchu je taktiež umiestnený aj bezpečnostný vetrací otvor [7] [14].

Z hľadiska efektivity uloženia článkov sa považuje tento tvar za najvýhodnejší. Pri tesnom uložení vznikajú iba minimálne vzduchové medzery medzi článkami, na rozdiel od cylindrických článkov. Pre túto vysokú efektivitu sa často osadzujú do batérií, ktoré majú byť zložené z väčšieho počtu článkov [12].

Umiestnenie kladného aj záporného pólu prináša výhodu pri spájaní viacerých článkov, pretože nie je potrebné vytvárať spoj na opačnej strane článku a ani izoláciu na spodnej strane, kde by bol kontakt umiestnený.

Bezpečnostný vetrací otvor funguje ako poistný ventil v prípade nadmernej tvorby plynov vo vnútri článku, zapríčineným nadmerným ohriatím elektrolytu. V prípade absencie ventilu by mohlo dôjsť k čiastočnému poškodeniu vonkajšieho obalu článku, prípadne až k jeho explózií [7].

Polymérové články (Obrázok 2.5 c)) sa najviac využívajú v zariadeniach, ktoré vyžadujú vyšší výkon aj celkovú kapacitu spolu so zachovaním nízkej hrúbky batérie. Ich obal je tvorený tenkou polymérovou fóliou, ktorá robí článok flexibilným a zároveň umožňuje dosiahnuť nižšiu celkovú hrúbku článku [12].

Li-ion polymérové batérie, označované ako Li-pol, fungujú podobne ako iné lítium iónové batérie, avšak namiesto tekutého elektrolytu majú medzi elektródami polymérovú maticu, v ktorej sú obsiahnuté soli lítia spolu s rozpúšťadlami [15]. Ako pripájacie vývody väčšinou slúžia ploché pásové kontakty, ktoré sa navzájom spájajú mechanicky, laserom alebo ultrazvukom. V mnohých prípadoch však článok obsahuje samostatný nabíjací a ochranný obvod, z ktorého sú vývody tvorené obyčajnými lankovými vodičmi. Skutočné Li-pol batérie, ktoré majú namiesto tekutého elektrolytu medzi elektródami suchý pevný polymér, v realite nie sú príliš často používané kvôli ich problémom s funkciou pri bežnej teplote používania.

Gombíkové batérie predstavujú najmenší z bežne používaných formátov batérií. Najväčšia má cylindrický priemer iba 20 mm. Tento malý formát sa používa v aplikáciách, v ktorých je dostatočne nízky odber prúdu a ich požiadavkou je malý rozmer batérie. Kladný kontakt tvorí telo článku a záporný je na vrchnej strane oddelený gumeným krúžkom, ktorý zároveň slúži ako tesnenie článku [16].

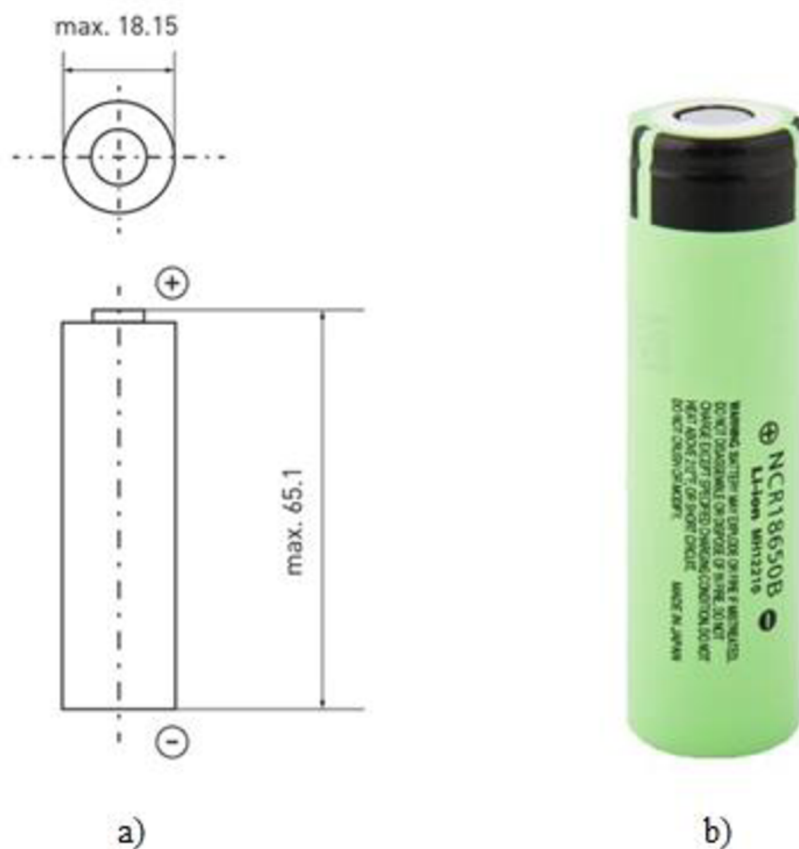


Obrázok 2.6 Gombíkový článok [17]

2.4 Článok veľkosti 18650

Pod označením 18650 sa rozumie cylindrický článok s priemerom 18 mm a výškou 65 mm. Každý výrobca používa mierne odlišné konkrétne rozmery líšiace sa v desatinách milimetra. Rozdiely v rozmeroch sa odvíjajú od prítomnosti či absencie ochranného obvodu pod záporným pólom a od konštrukcie kladného pólu, naplocho alebo vyvýšeného s vetracími otvormi.

Nominálne napätie jedného článku je 3,6 až 3,7 V. Bežná hodnota kapacity a maximálneho prúdového zaťaženia sa odvíja od použitého chemického zloženia elektród. Bežne dostupné články disponujú kapacitou v rozmedzí od 2000 mAh až po 3500 mAh pri nominálnom napätí. Trvalý vybíjací prúd sa pohybuje od 5 A do 20 A [18].



Obrázok 2.7 Zobrazenie bežného článku veľkosti 18650: a) technický nákres [19] a b) reálna podoba vyrobeného článku [20]

3. SPÁJANIE ČLÁNKOV

V procese návrhu a výroby elektronických zariadení, ktoré majú byť napájané z batérií, je často nutnosťou vytvoriť sústavu niekoľkých článkov za účelom vytvorenia požadovaného napätia, prúdovej zaťažiteľnosti a kapacity. Spájanie článkov sa inak nazýva aj kontaktovanie. Pri spájaní viacerých článkov je dôležité dbať na to, aby na samotných spojoch nevznikli straty ovplyvňujúce chod a bezpečnosť daného zariadenia. V tejto kapitole sú predstavené hlavné problémy spájania, niekoľko druhov spájania a zhodnotenie vhodnosti ich použitia.

3.1 Hlavné problémy kontaktovania článkov

Kontaktovanie článkov môže sprevádzať viacero rôznych výziev a problémov, ktorým je nutné predchádzať. Snahou výrobcov je vytvoriť kvalitný spoj medzi viacerými článkami s použitím spojovacieho prvku, napríklad pásových, okrúhlych alebo iných vodičov.

Kvalitný spoj sa vyznačuje veľmi nízkym prechodovým odporom, vysokou mechanickou pevnosťou a dlhou životnosťou. V prípade vytvorenia nekvalitného spoja dochádza k zvýšenému úbytku napätia na spoji z dôvodu vyššieho prechodového odporu, čo vedie k zbytočnej výkonovej strate a nechcenému hromadeniu tepla. Nekvalitný spoj taktiež disponuje nedostatočnou mechanickou pevnosťou, vplyvom mechanického pôsobenia môže dôjsť k zničeniu spoja a oddeleniu článku od celej zostavy článkov [21] [22].

Pri vytváraní kvalitného spoja je nutné neprekračovať teplotné limity stanovené výrobcom, ako sú maximálna teplota a doba výskytu tejto teploty na článku. V prípade prekročenia týchto parametrov hrozí poškodenie článku spôsobené nadmerným ohriatím chemicky aktívnych súčastí článku [21].

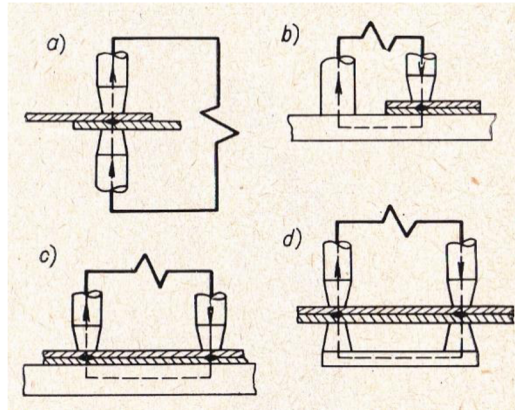
Hlavným cieľom pri procese kontaktovania článkov je teda vytvorenie čo najkvalitnejšieho spoja s nízkym prechodovým odporom tak, aby nedochádzalo k prehriatiu článku.

3.2 Typy používaných spojov

Bodové odporové zváranie je jeden z najpoužívanejších typov spájania článkov. Táto metóda funguje na princípe spájania viacerých materiálov pomocou prechodu elektrického prúdu. Prúd na zváranie dodávajú elektródy umiestnené na povrchu zváraného materiálu [23].

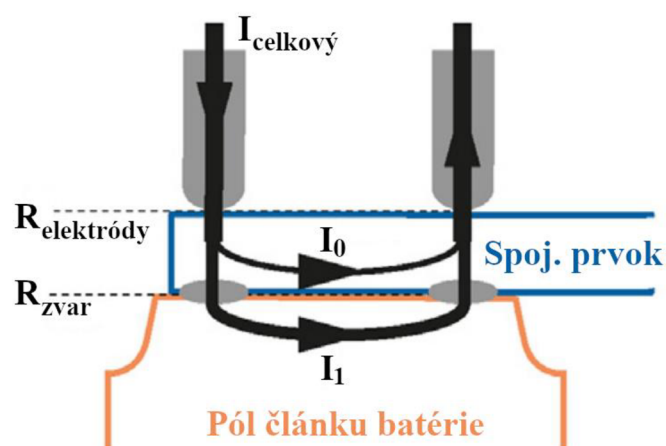
Pri uzavretí obvodu začne tiecť cez elektródy a zvárané materiály prúd, vytvárajúci teplo v miestach so zvýšeným elektrickým odporom [24]. Pôsobením vznikajúceho tepla narastá teplota v miestach s najvyšším prechodovým odporom a tieto miesta natavuje. Po rýchlom ochladnutí a vytvrdnutí vzniká okrúhly spoj, nazývaný nuget [25].

Bežne sa používajú dva druhy vytvárania zváraných spojov, ktoré sa líšia rôznym postavením zváracích elektród. **Priame zváranie**, kedy sú elektródy v protichodnom postavení a zváraný spoj vzniká priamo v ich ose (Obrázok 3.1 a)). **Nepriame zváranie**, kedy vzniká jeden (Obrázok 3.1 b)) alebo dva zvary (Obrázok 3.1 c), d)). V posledných troch zapojeniach prúd prechádza okrem zváraného materiálu aj cez prídavný materiál, ktorý by mal mať vyššiu vodivosť ako materiál v kontakte s elektródami [23].



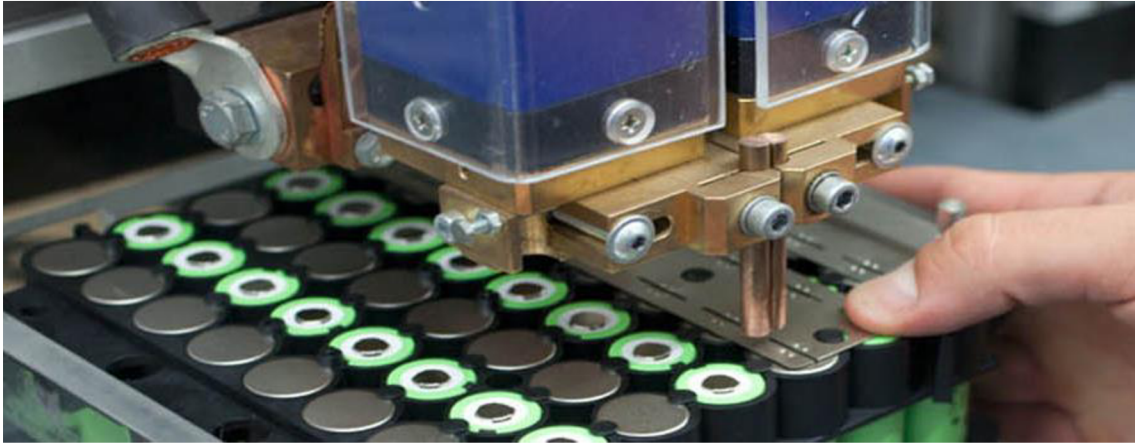
Obrázok 3.1 Rôzne postavenie elektród pri bodovom odporovom zváraní [23]

Snahou je, vid' Obrázok 3.2, aby medzi elektródami a povrchom materiálov bol prechodový odpor $R_{\text{elektródy}}$, blízky nule. Naopak, pri prechodovom odpore R_{zvar} , medzi zváranými materiálmi je požadované, aby bol odpor vysoký ale pri zachovaní požadovaného prúdu obvodom. V prípade vysokého odporu medzi elektródami a povrchu materiálu môže dochádzať k natavovaniu a následnému prilepeniu elektród k povrchu materiálu. Elektródy bývajú spravidla medené, aby sa minimalizoval ich odpor a taktiež spomínané prilepenie na zváraný materiál [21].



Obrázok 3.2 Elektrické odpory a prúdy na rozhraní dvoch zváraných materiálov pri odporovom zváraní [21]

Hlavnými parametrami pri odporovom zváraní je správny výber materiálov, veľkosť prúdového pulzu, doba jeho trvania a aplikovaná prítlačná sila. V prípade kontaktovania cylindrických článkov sa jedná o paralelne postavené elektródy, takže prúd prechádzajúci elektródami $I_{\text{celkový}}$, podľa Obrázku 3.2, obsahuje okrem užitočného prúdu I_1 aj prúd I_0 , ktorý preteká iba cez vrchný spojovací pás a nie cez vývod zváraného článku. Nežitočná zložka prúdu tak zväčšuje celkový prúd prechádzajúci elektródami a preto je nutné naddimenzovať hodnotu vstupného prúdu tak, aby bolo možné vytvoriť kvalitný spoj [21].

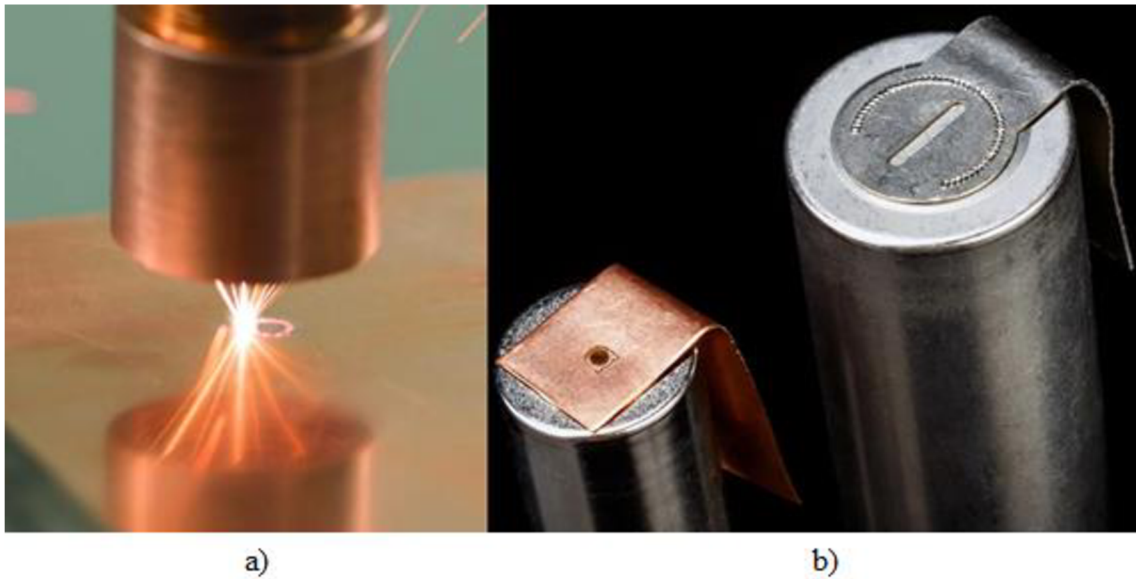


Obrázok 3.3 Poloautomatická bodová odporová zväračka ovládaná operátorom pri bodovaní článkov veľkosti 18650 [26]

Laserové zváranie je ďalšou často používanou metódou, pričom sa jedná o bezkontaktný proces spájania viacerých kovových častí s pomocou laserového lúča. Pôsobením laserového lúča na požadovaný bod zvaru sa zváraný materiál ohreje vo veľmi krátkom okamihu na vysokú teplotu a následným vychladnutím vznikne zváraný spoj [22].

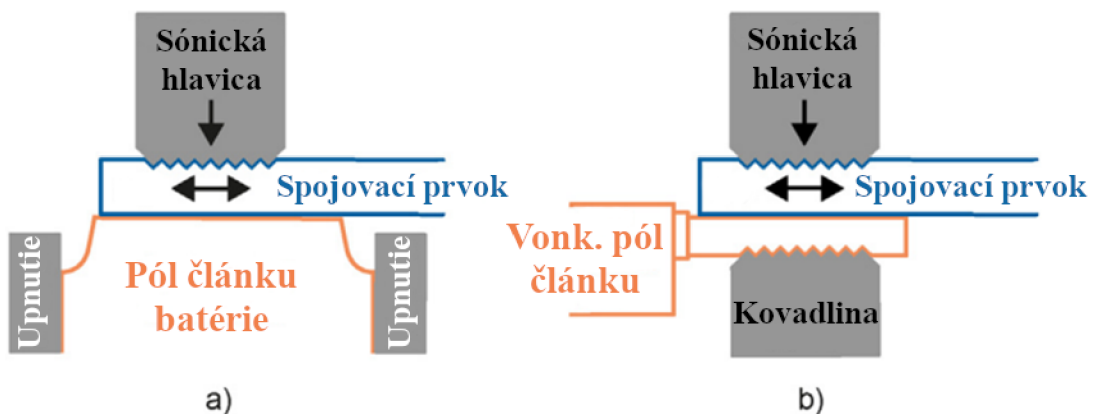
Metóda laserového zvárania sa používa na uzavretie obalov článkov batérií, na vytváranie vnútorných spojov v článkoch a na vzájomné prepájanie článkov, či už priamo alebo nepriamo, s pomocou použitia spojovacej zbernice. S použitím pulzujúceho nízko-výkonného ND:YAG lasera je možné dosiahnuť veľmi malé a presné pôsobisko tepla, čím nedochádza k zbytočnému prehrievaniu okolia zvaru [22].

Keďže sa jedná o bezkontaktný proces a nedochádza k nežiaducemu prehrievaniu článku, predstavuje laserové zváranie jednu z najvýhodnejších metód pre výrobu lítiových batérií skladaných z nakontaktovaných článkov. Pri výrobe spojov touto metódou je potrebné použiť materiál s nízkou odrazivosťou a vysokou absorpciou pre vlnovú dĺžku žiarenia použitého lasera a dodržať vysokú čistotu povrchu zváraných materiálov [22].



Obrázok 3.4 Bodové zváranie článku laserovou metódou: a) laserová hlavica [27] a b) medený a oceľový kontakt napojený na cylindrických článkoch [28]

Ultrazvukové zváranie je iná metóda, ktorá sa používa v batérovom priemysle. Označuje proces vytvorenia pevného spojenia dvoch alebo viacerých materiálov s využitím energie ultrazvuku. Pôsobením horizontálneho kmitavého pohybu sónickej hlavice na vysokej frekvencii (obvykle viac ako 20 kHz) sa narušujú nečistoty na povrchu materiálov a vytvára sa väzba na rozhraní materiálov so zvýšenou teplotou. Ultrazvukové zváranie je možné použiť na spojenie viacerých vrstiev materiálov s rozličnými vlastnosťami a rozmermi [22].



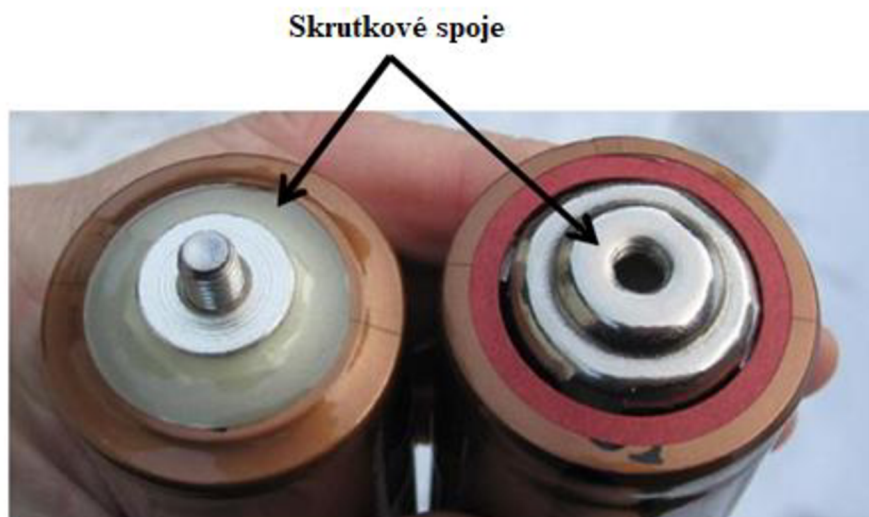
Obrázok 3.5 Ultrazvukové zváranie a) na cylindrickom článku a b) na vonkajšom kontakte článku [21]



Obrázok 3.6 Ultrazvukové zváranie a) niekoľkých medených fólií dokopy [29] a b) medeného kontaktu na vrchný kontakt cylindrického článku [30]

Pre väčšinu aplikácií je plne dostačujúce použiť na spájanie článkov niektorú z metód zvárania. Avšak pre modulárne spájanie, prípadne pre aplikácie, ktoré vyžadujú častú údržbu alebo opravy, nie sú trvalé spoje napevno vhodné. Preto sa používajú dočasné mechanické spoje, ktoré je možné podľa potreby rozpojiť a opakovane spojiť [22].

Mechanické spoje môžu byť tvorené skrutkami, maticami alebo výstupkami, ktoré do seba zapadajú [22]. V prípade, že nie sú takéto spojovacie prvky umiestnené na článok už pri samotnej výrobe, je nutná ich dodatočná montáž. Pri dodatočnej montáži sa využije niektorá z metód zvárania alebo nejaká iná metóda fixácie. Pretože nie sú štandardne montované vo výrobe, výrazne tak navyšujú jednotkovú cenu článku.



Obrázok 3.7 Mechanické spoje na cylindrických článkoch [22]

3.3 Zhrnutie vyššie predstavených metód spájania

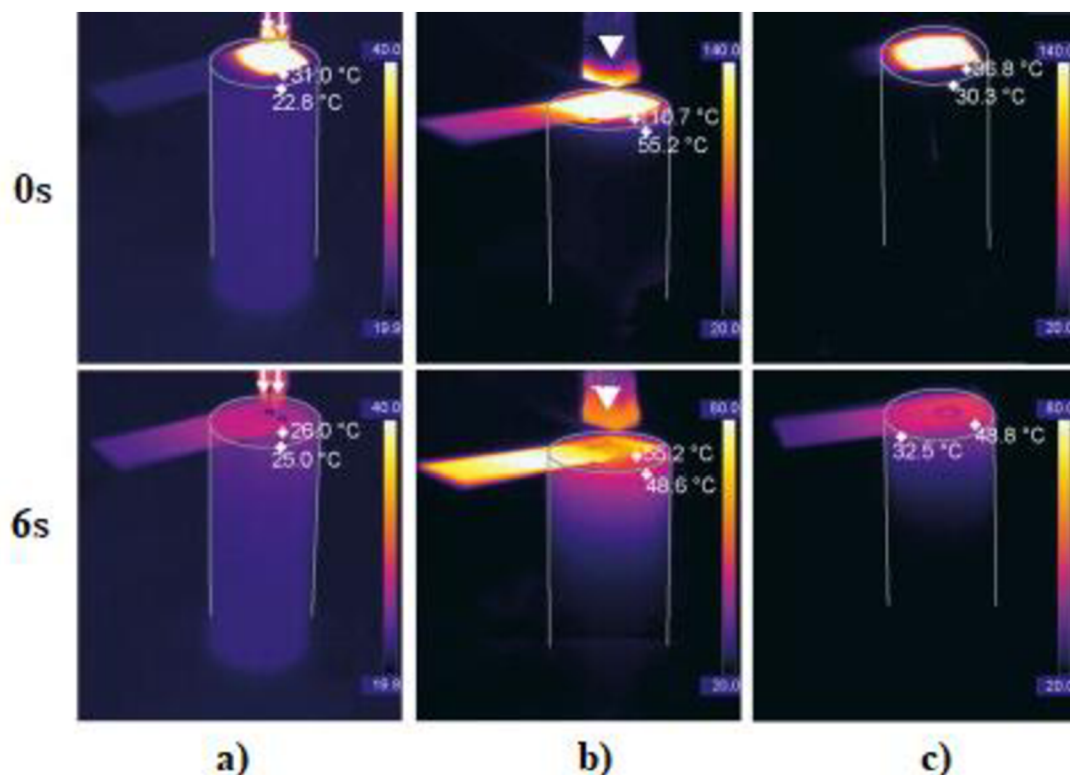
Z predstavených metód kontaktovania má každá svoje využitie vo výrobe a ich použitie závisí hlavne na vybavení výrobcu a požiadavkách koncového výrobku, v ktorom budú články používané.

Laserové zváranie môže dosiahnuť relatívne nízke hodnoty prechodového odporu, pričom je však nutné vytvoriť široký spoj s veľkou plochou [21].

Odporové zváranie dosahuje výsledný prechodový odpor približne rovnaký ako pri laserovom zváraní, avšak teplota dosahuje oveľa nižších hodnôt a na menšej ploche pôsobenia. Spoje vytvorené odporovým zváraním je vhodné použiť iba pre aplikácie, ktoré nevyžadujú prúdové zaťaženie vyššie ako 20 A na jednom článku [21].

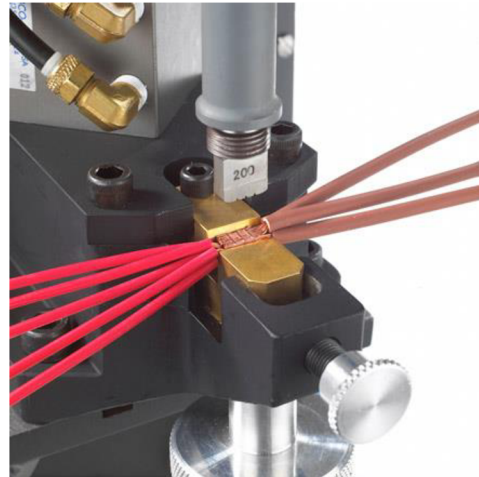
Ultrazvukové zváranie je často využívané pre svoju schopnosť spojiť viacero vrstiev materiálov, avšak plocha s vyššou teplotou je neporovnateľne väčšia než pri laserovej ako aj odporovej metóde [21].

Mechanické spoje môžu dosiahnuť najnižšie prechodové odpory zo všetkých metód pri veľmi malom až nulovom teplotnom pôsobení [22]. Ak je však potrebná dodatočná montáž mechanických spájacích prvkov a využije sa niektorá z metód zvárania, výhoda nulového teplotného namáhania článku zaniká.



Obrázok 3.8 Grafické znázornenie teplotného zaťaženia pri a) odporovom, b) laserovom a c) ultrazvukovom zváraní na článku veľkosti 2660 tesne po zváraní a šesť sekúnd po skončení zvárania [21]

V priemysle sa bežne používajú automatizované linky vybavené robotmi, prípadne poloautomatmi, obsluhovanými ľudskými pracovníkmi. Pre menšie výroby sa používa proces selektívneho spájania, najčastejšie s použitím odporových bodových spojov. Tento proces je často vykonávaný manuálne s použitím jednoduchého zariadenia na bodovanie. Ostatné metódy selektívneho spájania článkov využívajú mechanické typy spojenia, či už závitové alebo pružinové.



Obrázok 3.9 Poloautomatická priemyselná ultrazvuková zvaračka, pri spájaní niekoľkých medených vodičov [31]



a)



b)

Obrázok 3.10 Priemyselne používané poloautomatické stroje: a) laserová zvaračka [32] a b) odporová bodová zvaračka [33]

4. CIELE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Cieľom tejto práce je navrhnúť konštrukciu zariadenia schopného kontaktovania článkov lítiových batérií. Kontaktovanie má byť na báze bodového odporového zvarovania. Zariadenie musí umožňovať jednoduchú obsluhu a manipuláciu, musí obsahovať základné bezpečnostné prvky. Proces kontaktovania musí spôsobovať iba minimálne teplotné zaťaženie na kontaktovaný článok.

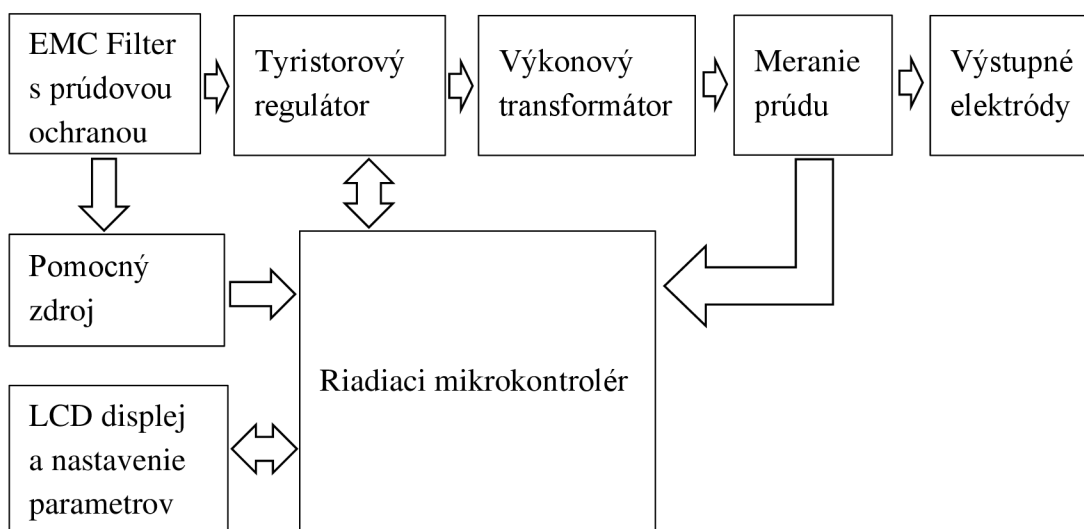
Dielčie ciele:

- Zoznámenie s problematikou kontaktovania lítiových batérií, hlavne veľkosti 18650, s ohľadom na prestup tepla
- Návrh konceptu kontaktovačky pre lítiové batérie
- Kontaktovačka musí disponovať možnosťou regulácie prúdu
- Skonštruovanie prototypu navrhnutého zariadenia
- Vytvorenie dokumentácie zariadenia
- Vykonanie príslušných meraní a nastavení
- Experimentálne overenie prevádzky hotového výrobku

5. NÁVRH KONCEPTU BODOVEJ ZVÁRAČKY

Táto kapitola obsahuje návrh a konštrukciu zväračky na princípe bodového odporového zvärania s reguláciou výstupného prúdu. V tomto návrhu sa uvažovalo s použitím fázovej regulácie napätia vstupujúceho do výkonného transformátora s nízkym transformačným prevodom, ktorý následne pretransformuje relatívne nízku hodnotu vstupného prúdu na niekoľkonásobne vyššiu hodnotu výstupného prúdu.

Konštrukciu zariadenia je možné rozdeliť na niekoľko častí, pričom každá plní inú funkciu. Spojenie týchto častí opisuje blokové schéma na Obrázku 5.1. Napájacie napätie vchádza do EMC filtra a výstupný prúd vychádza z výstupných elektród. Každý z týchto blokov je v tejto kapitole podrobne vysvetlený a príslušné návrhy a predlohy DPS obsahuje Príloha A až Príloha K.



Obrázok 5.1 Bloková schéma návrhu bodovej zväračky

5.1 EMC filter a pomocný zdroj

Tento filter, ako už názov vypovedá, plní funkciu potlačenia rušenia. Samo zariadenie produkuje elektromagnetické rušenie, hlavne budiacimi obvodmi tyristorového regulátora. Okrem toho rušenie prichádza aj z verejnej siete elektrickej energie, na ktorú je zariadenie napojené. Filter má za úlohu potlačiť rušenie z oboch týchto zdrojov.

Samotný filter využíva zapojenie spoločnej tlmivky, dvoch hlavných a dvoch vedľajších kondenzátorov, na svojom vstupe aj výstupe. Pred filtrom je taktiež umiestnená keramická tavná poistka, slúžiaca ako nadprúdová ochrana pre odpojenie v prípade vysokého odoberaného prúdu.

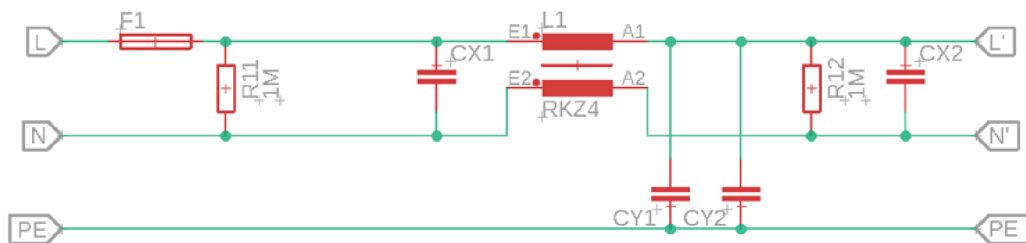
Pomocný zdroj zabezpečuje okrem napájania riadiacich obvodov aj napájanie chladienia, pretože zariadenie obsahuje viacero výkonových prvkov, ktoré produkujú

teplo. Všetky takéto prvky s vyššou výkonovou stratou sú umiestnené na pasívnych hliníkových chladičoch. Krycia konštrukcia je vybavená ventilátorom pre správny odvod tepla od týchto chladičov a hlavného transformátora.

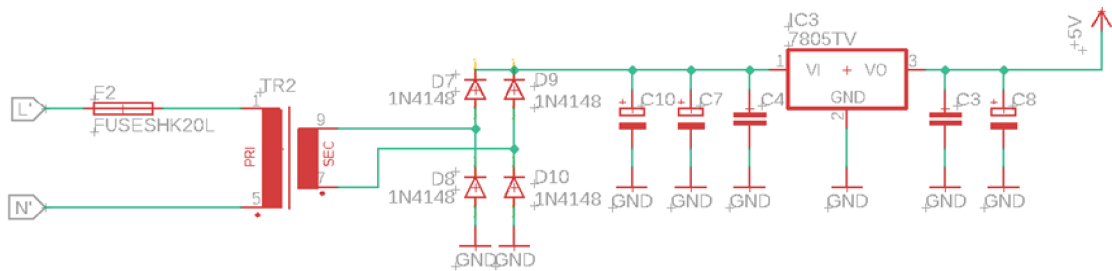
Väčšina riadiacich prvkov pracuje s napájacím napätím 5 V, výnimkou je operačný zosilňovač, použitý pre prúdový prevodník na meranie výstupného prúdu, kde sa používa symetrické napätie ± 15 V.

Pomocný napájací zdroj pre riadenie a pomocné obvody bol navrhnutý s ohľadom na najväčšiu spoľahlivosť a jednoduchosť. Pre zníženie napätia na pracovnú úroveň je použitý zaliaty sieťový transformátor, to je ďalej usmernené dvojcestným usmerňovačom a stabilizované lineárnym stabilizátor LM7805 pre napätie 5 V.

Špeciálne napájanie zosilňovača ± 15 V pre prúdový prevodník zabezpečuje samostatný modul RAC20-15DK, ktorý disponuje integrovaným meničom AC/DC s galvanickým oddelením, vďaka čomu nie je potrebné používať separátny transformátor, ale využije sa priamo výstup z EMC filtra.



Obrázok 5.2 Schéma vstupného filtra s tavnou poistkou

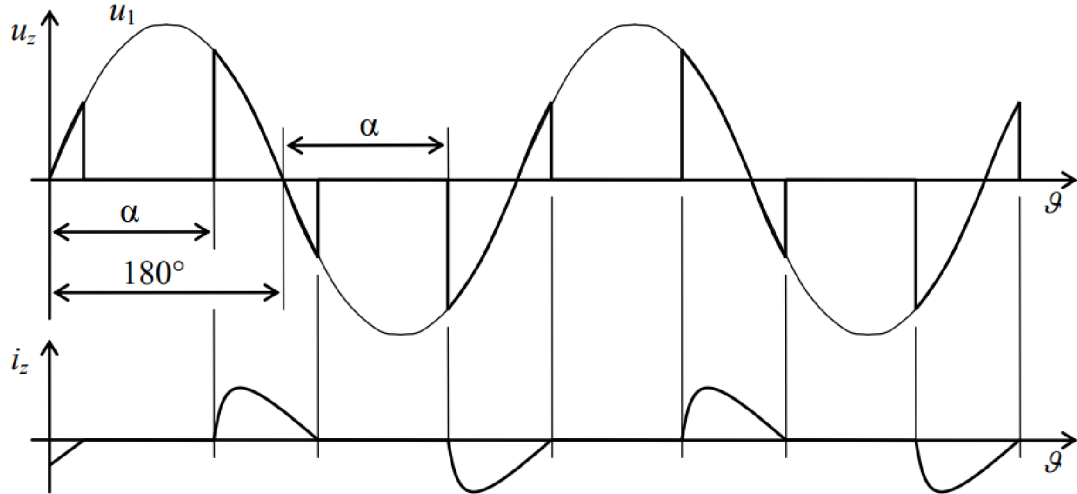


Obrázok 5.3 Schéma zapojenia pomocného zdroja

5.2 Tyristorový regulátor

Blok tyristorového regulátora je zložený z detektora nulového napätia siete, obvodov pre spínanie tyristorov a antiparalelného zapojenia dvoch tyristorov (Obrázok 5.5). Regulátor za pomoci fázového riadenia reguluje napätie vstupujúce do výkonového transformátora a tým aj veľkosť prúdu sekundárneho vinutia transformátora.

Fázová regulácia obvodu s RL záťažou, vid' Obrázok 5.4, funguje na princípe blokovania začiatkovej časti periódy vstupného napätia u_1 za pomoci oneskoreného otvárania tyristorov. Okamih otvorenia tyristora je vyjadrený ako spínací uhol α , ktorý vyjadruje úsek z celkovej periódy ϑ .



Obrázok 5.4 Priebeh napätia a prúdu na výstupe a vstupe tyristorového regulátora pri RL záťaži [42]

Následne priebeh výstupného napätia u_z tvorí iba zlomok priebehu u_1 a výstupný prúd i_z je teda závislý na spínacom uhle α , podľa vzťahu (5.1) [41].

$$i_z = \frac{U_{1\text{MAX}}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \left[\sin(\omega t - \varphi) - R \frac{\omega t}{\omega \tau} \sin(\alpha - \varphi) \right] \quad [A] \quad (5.1)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) [^\circ] \quad (5.2)$$

$$\tau = \frac{L}{R} [s] \quad (5.3)$$

Výstupný prúd i_z sa skladá z dvoch častí, kedy jednu časť tvorí sínusový prúd posunutý voči napätiu o uhol φ , vyjadrený rovnicou (5.2). Druhú časť dopĺňa prechodná zložka, exponenciálne klesajúca s časovou konštantou τ , podľa vzťahu (5.3). Tieto závislosti sú platné pre α v rozmedzí $\varphi < \alpha < 180^\circ$. V prípade, že $\alpha = \varphi$, regulátor je plne otvorený a obvodom tečie maximálny prúd. S rastúcim uhlom α klesá prúd v obvode. V prípade, že $\alpha = 180^\circ$, regulátor je zavretý a obvodom netečie žiadny prúd [41].

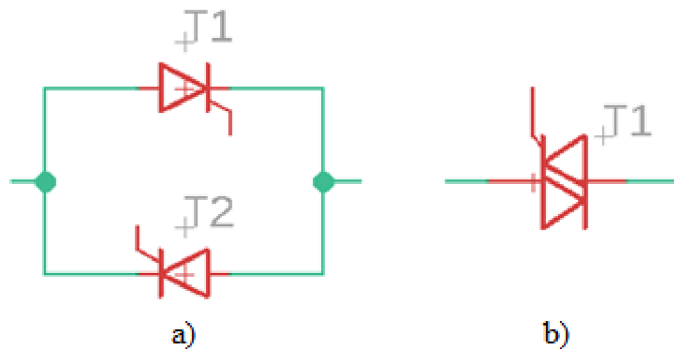
Antiparalelné zapojenie tyristorov, podľa Obrázok 5.5 a), znamená, že každý tyristor má spojenú svoju katódu s anódou druhého tyristora a každý z nich vedie prúd iba v jednom zo smerov prúdu tečúceho obvodom. Alternatívou tohto zapojenia je použitie triaku, ktorý predstavuje toto zapojenie integrované v rámci jednej súčiastky. Použitie dvoch tyristorov je lepšie riešenie, keďže zapojenie s triakom je považované za menej

spoľahlivé riešenie, kvôli problémom s teplotnou stabilitou a problémom, ktoré môžu nastať pri jeho komutácií, čiže pri zmene smeru toku prúdu obvodom.

Detektor nulového napätia je realizovaný pomocou zapojenia fototranzistoru. Zapojenie zaisťuje galvanické oddelenie od siete a udržiava na svojom výstupe nízku logickú úroveň, okrem prípadu, kedy je napätie siete nižšie ako približne ± 2 V a na okamih sa na výstupe objaví vysoká logická úroveň. Výstup z detektoru nulového napätia je pripojený na vstup mikrokontroléra, ktorý výstupný signál ďalej spracuje.

Obvody pre spínanie tyristorov sa inak nazývajú aj budiacimi obvodmi. Jadrom týchto budiacich obvodov je impulzný transformátor s trojitým vinutím s identickým počtom závitov, podrobnejšie opísaný v nasledujúcej kapitole 5.3. Transformátor zaisťuje galvanické oddelenie od sieťového napätia na tyristoroch a taktiež galvanické oddelenie medzi riadiacimi elektródami samotných tyristorov. Galvanické oddelenie je možné dosiahnuť aj pomocou už spomenutého fototranzistoru alebo iného optického prvku, avšak tie nevykazujú dostatočnú spoľahlivosť a môžu vytvárať falošné signály.

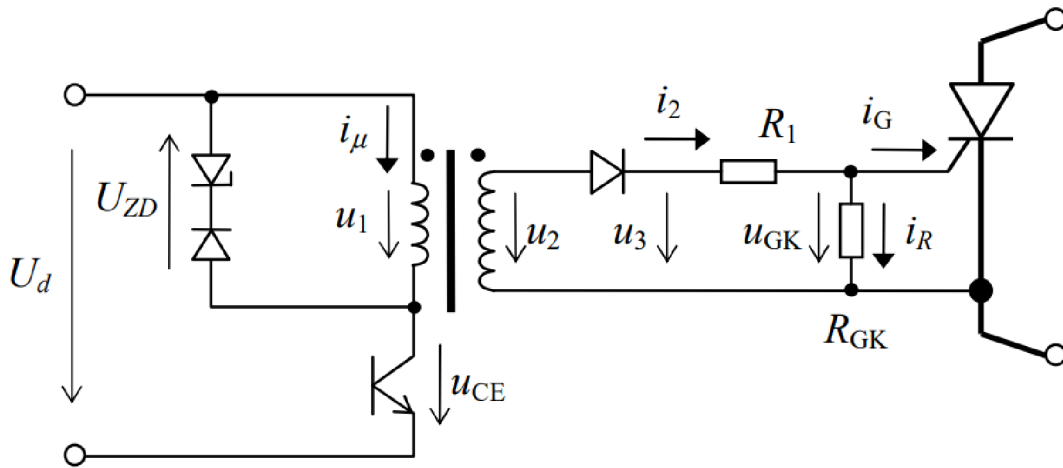
Pomocou použitých budiacich obvodov je možné výstupom z mikrokontroléra ovládať tyristory, a to dodaním prúdových impulzov do ich riadiacich elektród. Spomínané impulzy sú dodávané od doby zopnutia konkrétneho tyristoru až do okamihu detekcie nulového napätia na vstupe. Obidva tyristory sú budené súčasne, pretože aj napriek prítomnosti budiacich impulzov na riadiacej elektróde, k zopnutiu dochádza iba na tyristore s korektnou polaritou napätia, teda kladným napätím medzi anódou a katódou. Týmto riešením sa zjednodušuje konštrukcia za cenu vyššej spotreby, kvôli výkonovej strate vznikajúcej pri budení tyristora s nekorektnou polaritou.



Obrázok 5.5 Antiparalelné zapojenie dvoch tyristorov a zapojenie triaku

5.3 Budiace obvody

Priame ovládanie použitej dvojice tyristorov vykonávajú budiace obvody. Budiace obvody tvorí malá verzia jednočinného priepustného meniča s izolovanými výstupmi.



Obrázok 5.6 Doporučené zapojenie galvanicky oddeleného meniča s impulzným transformátorom [42]

Základom tohto obvodu je impulzný transformátor, ktorý je vinutý trifilárne, teda trojito, v pomere 1:1:1. Magnetické jadro transformátoru je toroidného tvaru z feritového materiálu CF139. Minimálny počet závitov vinutí je daný vzťahom:

$$N_p = \frac{U_d}{2 \cdot f \cdot B_{Max} \cdot S_{Fe}} \text{ [závitov]} \quad (5.4)$$

Maximálna indukcia je uvažovaná $B_{Max} = 0,2 \text{ T}$ a efektívny prierez použitého jadra je $S_{Fe} = 55,9 \text{ mm}^2$. Ako spínací tranzistor je použitý unipolárny tranzistor IFR630, ktorý je budený z mikrokontroléra pravouhlým signálom o kmitočte $f = 20 \text{ kHz}$ a striede $s = 0,5$. Ako napájacie napätie slúži hlavná napájacia vetva $U_d = 5 \text{ V}$. Z týchto údajov vychádza minimálny počet závitov na $N_p = 12$ závitov.

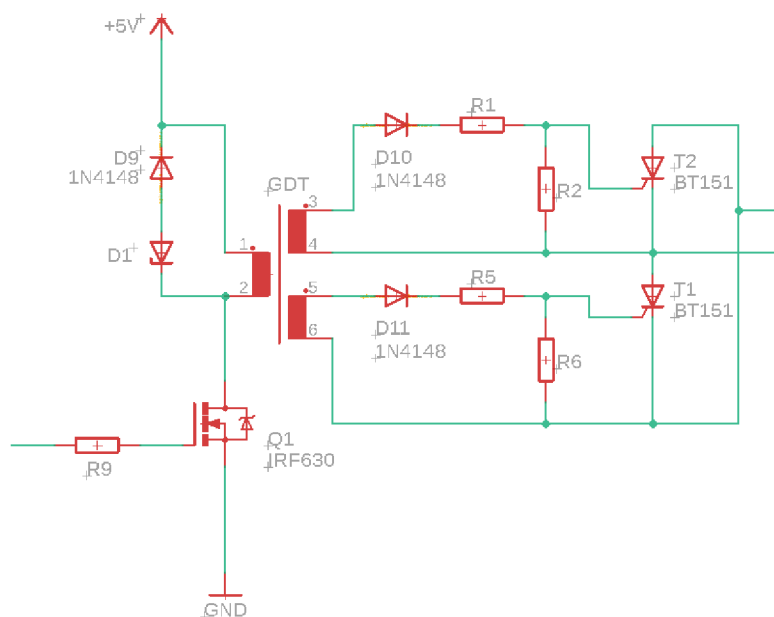
Podľa doporučeného zapojenia (Obrázok 5.6), musí byť sekundárne napätie usmernené a následne upravené na požadovanú hodnotu U_{GK} , k čomu slúži odporový delič tvorený rezistormi R_1 a R_{GK} . Veľkosť rezistoru R_{GK} je zvolená na základe veľkosti budiaceho prúdu tyristora I_G tak, aby prúd $I_R \cong I_G$.

Na určenie veľkosti rezistorov R_1 a R_{GK} slúžia nasledujúce rovnice:

$$R_{GK} = \frac{U_{GK}}{I_R} \text{ } [\Omega], \quad (5.5)$$

$$I_2 = I_G + I_R \text{ } [A], \quad (5.6)$$

$$R_1 = \frac{U_3 - U_{GK}}{I_2} \text{ } [\Omega]. \quad (5.7)$$



Obrázok 5.7 Schéma budiaceho obvodu použitého v návrhu zariadenia, na báze priepustného meniča

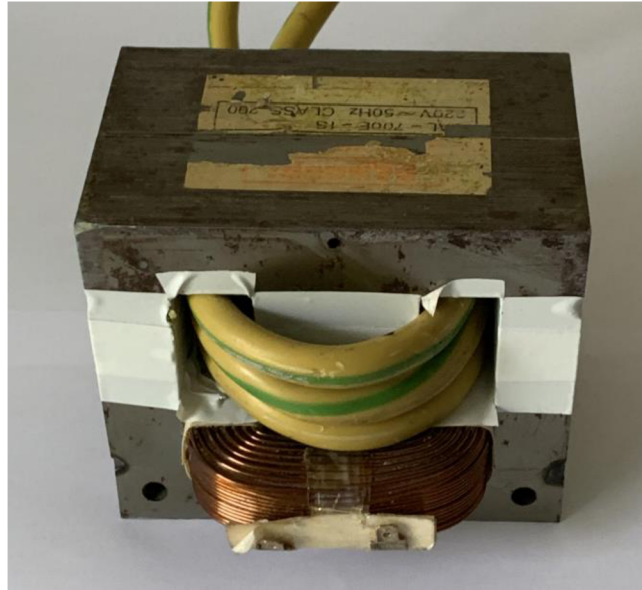
5.4 Výkonový transformátor

Transformátor, použitý v koncepte, má za úlohu znížiť hodnotu napätia na nižšiu úroveň pri zachovaní pôvodného výkonu. Sekundárne vinutie teda poskytuje vyššie maximálne prúdové zaťaženie než primárne vinutie. Pri ideálnom transformátore platí vzťah (5.8), ktorý napovedá o zachovaní transformačného pomeru [44].

$$K = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} \quad [-] \quad (5.8)$$

V tomto prípade je hodnota transformačného pomeru približne $K = 0,013$. Táto hodnota vychádza z približného počtu závitov primárneho vinutia $N_1 = 224$ závitov a použitého počtu závitov v sekundárnom vinutí $N_2 = 3$ závitov.

V konštrukcii je použitý transformátor pôvodne určený pre použitie v bielej technike, ktorý je dodatočne upravený pre účely tohto návrhu. Pôvodné sekundárne vinutie je odstránené a nové sekundárne vinutie tvorí niekoľko závitov medeného vodiča s prierezom 25 mm^2 .



Obrázok 5.8 Upravený výkonový transformátor

Výkonové straty na transformátore tvoria z veľkej časti straty vo vinutí, ale taktiež aj straty v železnom jadre. Podľa [43] majú transformátorové plechy merné straty $Z_{Fe} \cong 6 \text{ W/kg}$ pri maximálnej magnetickej indukčii $B_{max} \cong 1,8 \text{ T}$, takže výsledné celkové straty v jadre budú:

$$P_{Fe} = Z \cdot m_{Fe} = 24 \text{ W}. \quad (5.9)$$

Straty vo vinutí transformátora sú vyjadrené ako súčet strát v jednotlivých vinutiach:

$$P_{Cu} = P_{Cu_{pri}} + P_{Cu_{sek}} \text{ [W]} \quad (5.10)$$

$$P_{Cu} = R_{pri} I_{pri}^2 + R_{sek} I_{sek}^2 \text{ [W]} \quad (5.11)$$

5.5 Meranie prúdu

Pre správnu reguláciu prúdu je potrebné merať prúd pretekajúci obvodom a spracovaním týchto hodnôt ovládať regulátor pre dosiahnutie optimálneho prúdu výstupnými elektródami.

Možností merania prúdu je viacero: prúdovým transformátorom, Hallovoú sondou prípadne bočníkom. Meranie môže prebiehať na primárnej alebo sekundárnej strane hlavného transformátora. Podľa teoretických predpokladov, pri ideálnom transformátore z rovnice (5.8), je výkon dodaný do primárneho vinutia rovný výkonu, ktorý dodá sekundárne vinutie do záťaže. V praxi je však potrebné počítať aj so stratami vo vinutí a stratami v jadre transformátora.

V prípade merania prúdu pretekajúcim primárnym vinutím, musí byť nameraná hodnota znásobená transformačným pomerom, aby bol výsledkom prúd sekundárneho vinutia, zároveň je nutné počítať s už spomínanými stratami. Pri použití tejto metódy je

výsledná odchýlka v radoch desiatok A, čo je príliš veľká hodnota pre správne fungovanie regulácie.

Namiesto toho je použitá metóda merania prúdu sekundárnym vinutím, pomocou modulu prúdového prevodníka, vid' Obrázok 5.9. Tento modul využíva princíp Hallovej sondy vlozenej do medzery magnetického obvodu. Obvod Hallovej sondy udržuje na svojom výstupe hodnotu napätia, ktorá je lineárne závislá na aktuálnej hodnote meraného prúdu. Výstup z tohto obvodu je pripojený k mikrokontroléru, kde je ďalej spracovaný pomocou vstavaného A/D prevodníka.

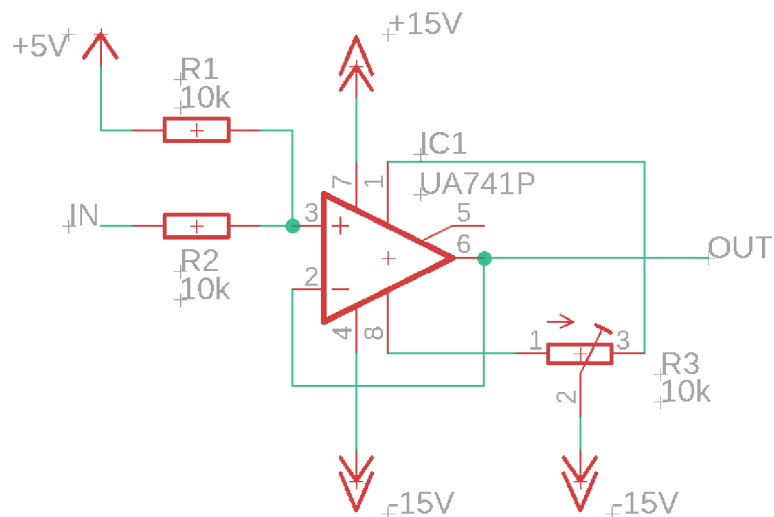


Obrázok 5.9 Použitý prúdový snímač HAT 1000-S [45]

Použitý modul prúdového prevodníka poskytuje na svojom výstupe napätie -4 V až 4 V, ktoré je nutné upraviť do rozsahu 0 V až 5 V, ten je už schopný spracovať A/D prevodník mikrokontroléra. Na tento účel sa použije obvod súčtového neinvertujúceho zosilňovača s operačným zosilňovačom UA741, podľa Obrázku 5.10. Tento zosilňovač je zapojený ako sledovač neinvertujúceho vstupu. Výstupné napätie z tohto obvodu $U_{výst}$ je v rozsahu 0,5 V až 4,5 V, pre zachovanie dostatočnej rezervy v napät'ovom rozsahu spomínaného A/D prevodníka. Závislosť napätia $U_{výst}$ na vstupnom napätí U_{vst} je vyjadrené vzťahom (5.12). Pre získanie výsledného zväracieho prúdu bol použitý vzťah (5.13).

$$U_{výst} \cong \frac{U_{vst}}{2} + 2,5[V] \quad (5.12)$$

$$I_{výst} \cong 500 U_{výst} + 1250[V] \quad (5.13)$$



Obrázok 5.10 Obvod prevodníka napät'ovej úrovne prúdového snímača

5.6 Riadenie a algoritmus

Pre správnu prevádzku zariadenia je nutné zabezpečiť správne ovládanie jednotlivých periférií zariadenia. Na bezchybnú reguláciu výstupného prúdu je potrebné použiť dostatočne presné kalkulácie a časovanie, súčasne je tiež nutné zabezpečiť korektné riadenie okolitých periférií. Pre centralizované riadenie každej časti zariadenia slúži mikrokontrolér.

Mikrokontrolér použitý v návrhu je súčasťou komerčne dostupného modulu Arduino Nano od firmy Arduino, viď. Obrázok 5.11. Tento modul obsahuje základné zapojenie mikrokontroléra ATmega328, vyrobeného spoločnosťou Atmel. V module je integrované jednoduché programovacie rozhranie, čo zjednodušuje zápis riadiaceho programu do použitého mikrokontroléra [34].



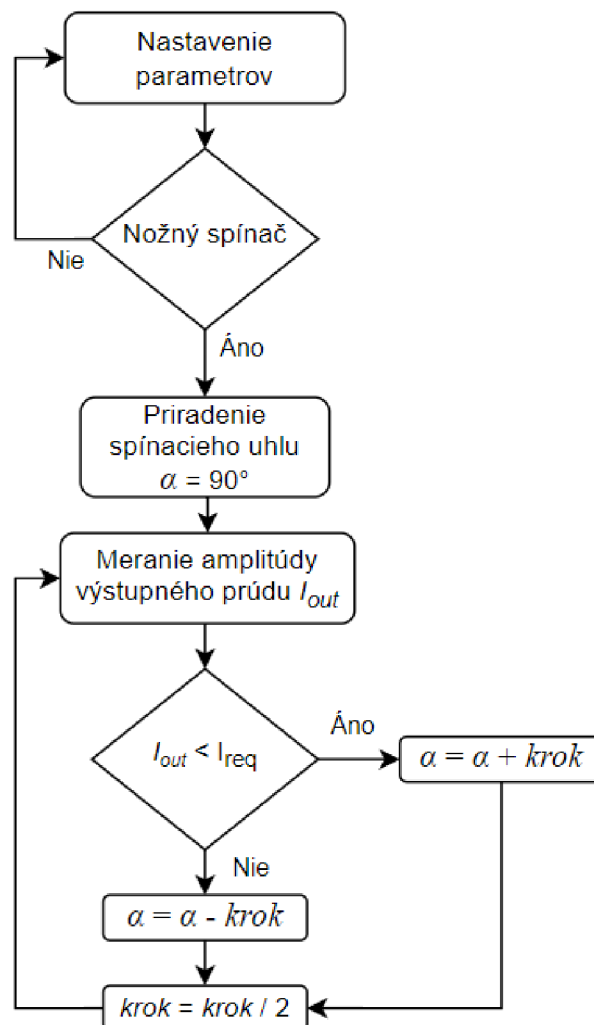
Obrázok 5.11 Modul mikrokontroléra Arduino Nano [35]

Riadiaci program, ktorý zabezpečuje správny chod zariadenia, sa skladá z časti, ktorá ovláda užívateľské rozhranie zariadenia a z časti, ktorá spracováva nameranú hodnotu výstupného prúdu a koriguje ho na požadovanú hodnotu.

Algoritmus korekcie, na Obrázku 5.12, sa uplatňuje v niekoľkých krokoch, pričom každý z nich sa uplatňuje v jednej polperióde vstupného napätia, teda v jednej polvlně.

V prvom kroku je nastavený spínací uhol tyristoru na hodnotu $\alpha = 90^\circ$, ktorá znižuje obmedzuje prúdový náraz, ktorý spôsobuje induktívny charakter výstupného výkonového transformátora.

V druhom kroku, na začiatku druhej polperiódy sa upraví uhol na základe hodnoty amplitúdy prúdu, zmeranej počas prvej polperiódy a vypočíta sa odchýlka od požadovanej hodnoty prúdu. V ďalších krokoch sa opakuje postup z druhého kroku a spínací uhol sa koriguje, až pokiaľ nebude odchýlka prúdu menšia ako 20 A alebo neuplynie nastavený časový limit zvrárania. Kompletný zdrojový kód riadiaceho programu obsahuje Príloha L.



Obrázok 5.12 Blokové schéma algoritmu korekcie prúdu

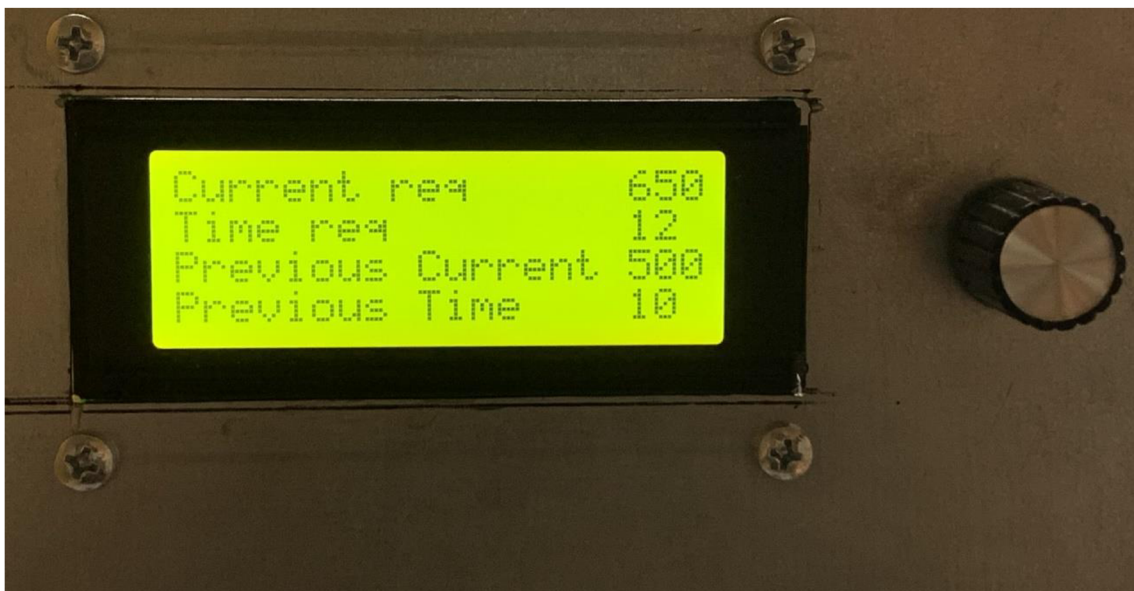
5.7 Ovládacie rozhranie

Pred začiatkom procesu zvárania je nutné nastaviť správne vstupné parametre pre vytvorenie kvalitného spoja. Pre jednoduché nastavenie parametrov zvárania disponuje zariadenie užívateľským rozhraním, v ktorom je možné nastaviť požadovanú amplitúdu zváracieho prúdu a dĺžku procesu zvárania nezávisle od seba. Užívateľské rozhranie pozostáva z LCD displeja a rotačného enkodéra.

LCD displej disponuje zobrazovacou plochou o veľkosti dvadsiatich stĺpcov a štyroch riadkov. Samotný displej využíva štandardné ovládacie rozhranie s integrovaným obvodom HD44780, avšak je doplnený modulom pre jednoduchšie ovládanie pomocou zbernice I2C. Rotačný enkodér poskytuje dvadsať pulzov za jednu otáčku, obsahuje integrovaný mikrospínač a taktiež komunikuje po zbernici I2C.

Zariadenie sa spúšťa zmenou polohy vypínača na zadnej strane krytu. Po zapnutí sa na pár sekúnd zobrazuje na LCD displeji úvodná obrazovka s informáciami o autorovi a aktuálnej verzii programu. Následne sa pomocou rotačného enkodéra, umiestneného na prednom paneli, nastaví požadovaná amplitúda pracovného prúdu s rozlíšením 1 A a stlačením gombíka enkodéra sa táto hodnota potvrdí. Po potvrdení sa nastavuje obdobným spôsobom požadovaný čas zvárania v kroku po jednom cykle, jeden cyklus odpovedá 10 ms. V prípade opätovného potvrdenia sa znovu nastavuje hodnota amplitúdy prúdu.

Po úspešnom nastavení je možné spustiť proces zvárania stlačením nožného spínača. Po skončení procesu zvárania sa na displeji zobrazia okrem novo nastavovaných hodnôt aj naposledy nastavené hodnoty, viď Obrázok 5.13.



Obrázok 5.13 Ovládacie rozhranie, nastavenie nových parametrov

5.8 Výstupné elektródy

Výstupné zváracie elektródy sú umiestnené na rukoväti, priamo určenej pre bodovanie batériových článkov. Elektródy sú vyrobené zo zliatiny medi, ktorá dosahuje vyššiu tvrdosť ako čistá meď, ale je možné použiť aj bežne dostupnú meď, napríklad z vodičov s plným jadrom. Samotné elektródy sú upevnené v pružných objímkach na hrotoch rukoväti. Rukoväť obsahuje prítlačný pružinový mechanizmus, ktorý umožňuje pohyb a ustálenie elektród vo vertikálnom smere.

Všeobecne je vhodné aplikovať dostatočný prítlak na spojovací prvok a zváraný článok, avšak v praxi je lepšie pôsobiť iba primeranou silou, inak dochádza k nadmernej deformácii pólu článku a zváracích elektród. Pri zväčšenej deformácii je výsledkom väčšia styčná plocha medzi spojovacím niklovým pásikom a pólom článku. Zvárací prúd teda nepreteká iba jedným malým bodom ale rôznymi miestami. Kvôli tejto skutočnosti zvárané materiály nemusia stihnúť dosiahnuť svoj bod tavenia a výsledkom je nekvalitný spoj.

Tvar elektród taktiež ovplyvňuje výsledky, pričom najlepšie výsledky by mali dosahovať elektródy so špicatým hrotom, ktoré sa ale taktiež rýchlo opotrebojú [40]. Kvôli tomuto opotrebeniu je nutné časté obrusovanie do pôvodného tvaru, aby sa zachovala kvalita vytvorených spojov.



Obrázok 5.14 Komerčne dostupné pero pre bodovanie článkov [39]

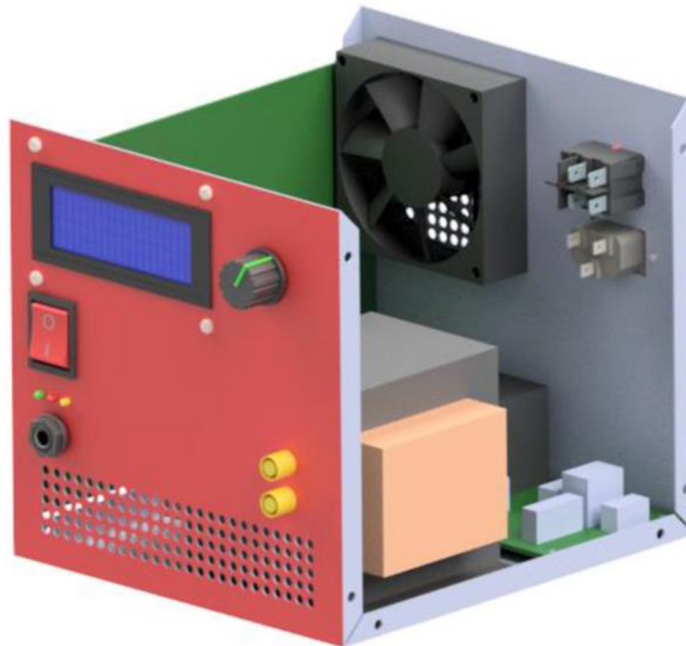
5.9 Krycie prvky a teplotné pomery zariadenia

Ochranný obal zariadenia, ako už z názvu vypovedá, slúži ako mechanická ochrana, ochrana samotných obvodov, ako aj ochrana používateľa a tiež ako estetický prvok.

Ochranu pred cudzími predmetmi je nutné dodržať z dôvodu možného narušenia chodu zariadenia, prípadne trvalého poškodenia zariadenia. Predmety, ktoré by mohli vniknúť do zariadenia, je možné klasifikovať ako nebezpečné, ak sú elektricky alebo teplotne vodivé, horľavé, reaktívne, zdravotne alebo inak nebezpečné.

Ochranný kryt chráni používateľa v prípade poruchy zariadenia, ktorá by mohla spôsobiť ujmu na zdraví používateľa alebo okolia. Taktiež slúži ako ochrana pred prípadným úrazom elektrickým prúdom, spôsobeným napätím siete a napätím z vnútorných obvodov zariadenia.

Ako materiál krytu zariadenia je použitý oceľový plech s hrúbkou 1 mm, s povrchom ošetreným ochrannou vrstvou zinku. Kryt je zložený z vrhnej a spodnej časti. Na spodnej časti sa nachádza DPS so vstupným filtrom a pomocným zdrojom, ktorá je prichytená skrutkami na dištančných stĺpikoch. Dištančné stĺpiky slúžia k vytvoreniu izolačnej medzery medzi krytom zariadenia a spodnou stranou dosky plošných spojov. Na zvýšenie bezpečnosti je vložená plastová fólia tenkej hrúbky medzi DPS a spodný kryt zariadenia, ktorá slúži ako prídavná vnútorná izolácia.



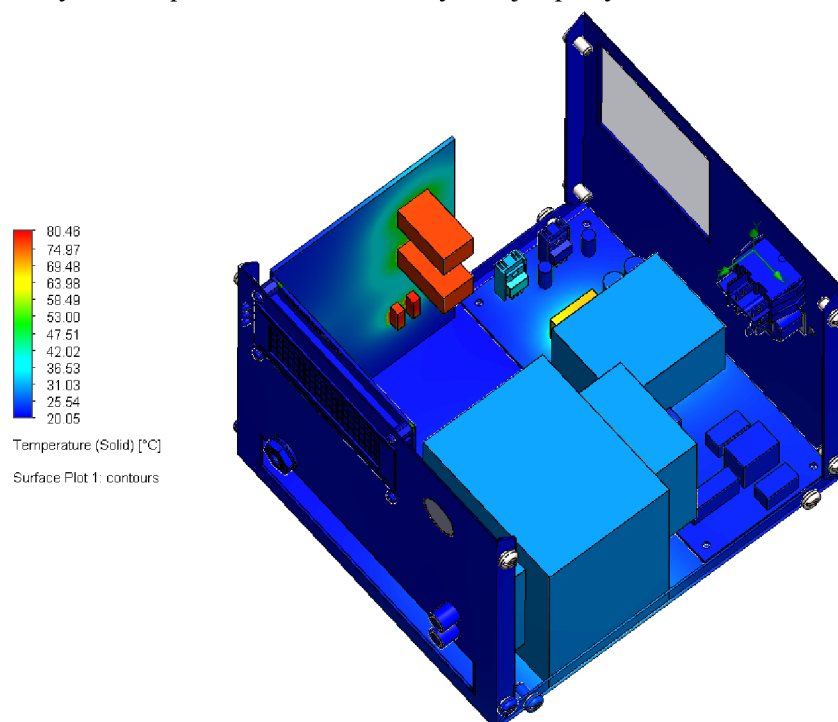
Obrázok 5.15 Model navrhovaného krytu zariadenia, pohľad na oddelenú hornú a spodnú časť

Spodná časť krycej konštrukcie obsahuje vetracie otvory v spodnej časti predného panela a v hornej časti zadnej steny. Na zadnom otvore je namontovaný chladiaci ventilátor, ktorý napomáha správnej cirkulácii vzduchu v uzavretom zariadení. Ventilátor

je umiestnený tak, aby do zariadenia vchádzal vzduch cez prednú mriežku a zadným otvorom bol odvádzaný mimo zariadenie. Technický výkres krycej konštrukcie zariadenia obsahuje Príloha M.

Na základe vypočítaných stratových výkonov na jednotlivých komponentoch bola pomocou softvéru SolidWorks vypracovaná teplotná simulácia, ktorej výpočet postupnými iteráciami dosiahol ustálený stav teplôt. Táto simulácia plní účel overenia správnosti návrhu zariadenia s ohľadom na vnútornú prevádzkovú teplotu v zariadení.

Simulácia prevádzky zariadenia, na Obrázku 5.16, ukazuje teplotné zaťaženie na jednotlivých komponentoch a súčiastkach. Simulácia bol vytvorená ako steady-state, teda statická, a jej úlohou bolo zistiť rozloženie teploty v modeli v prípade, že sú všetky komponenty kontinuálne v prevádzke a je na nich maximálny stratový výkon. Jedná sa teda o takzvaný najhorší možný scenár prevádzky zariadenia, ktorý je síce v prevádzke nereálny, ale teoreticky by mohol nastať pri poruche zariadenia alebo pri nesprávnej kontinuálnej prevádzke. Účelom tohto modelu je zistiť, či maximálne teploty na komponentoch budú v rozsahu maximálnych teplôt, ktoré sú povolené v katalógovom liste jednotlivých komponentov. Najväčšie oteplenie je očakávané na zrážacích rezistoroch, tyristoroch, lineárnom stabilizátore a diódovom usmerňovači. Porovnaním získaných hodnôt teplôt jednotlivých komponentov v tejto simulácii s hodnotami maximálnych povolených teplôt z katalógových listov jednotlivých komponentov bolo overené, že výsledný výrobok spĺňa požiadavky na bezproblémovú prevádzku a nehrozí zlyhanie žiadnych komponentov z dôvodu vysokej teploty vo vnútri zariadenia.

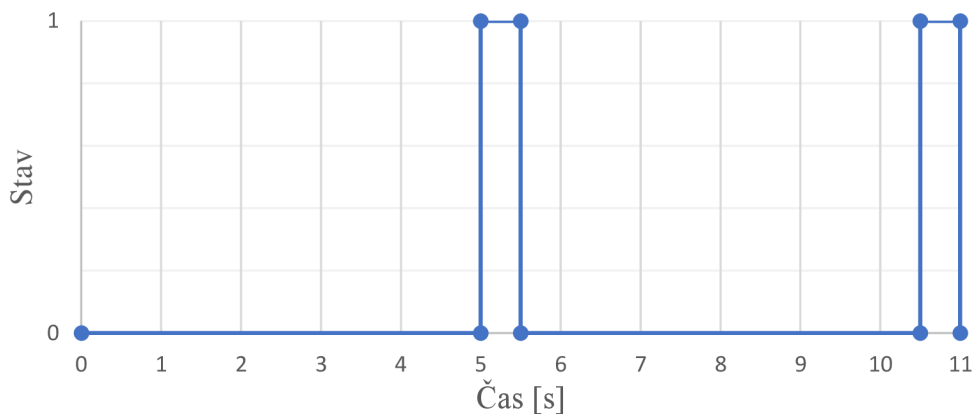


Obrázok 5.16 Statická teplotná simulácia vo vnútri zariadenia, horný pohľad



Obrázok 5.17 Hotový prototyp bodovej zväračky pre lítiové batérie

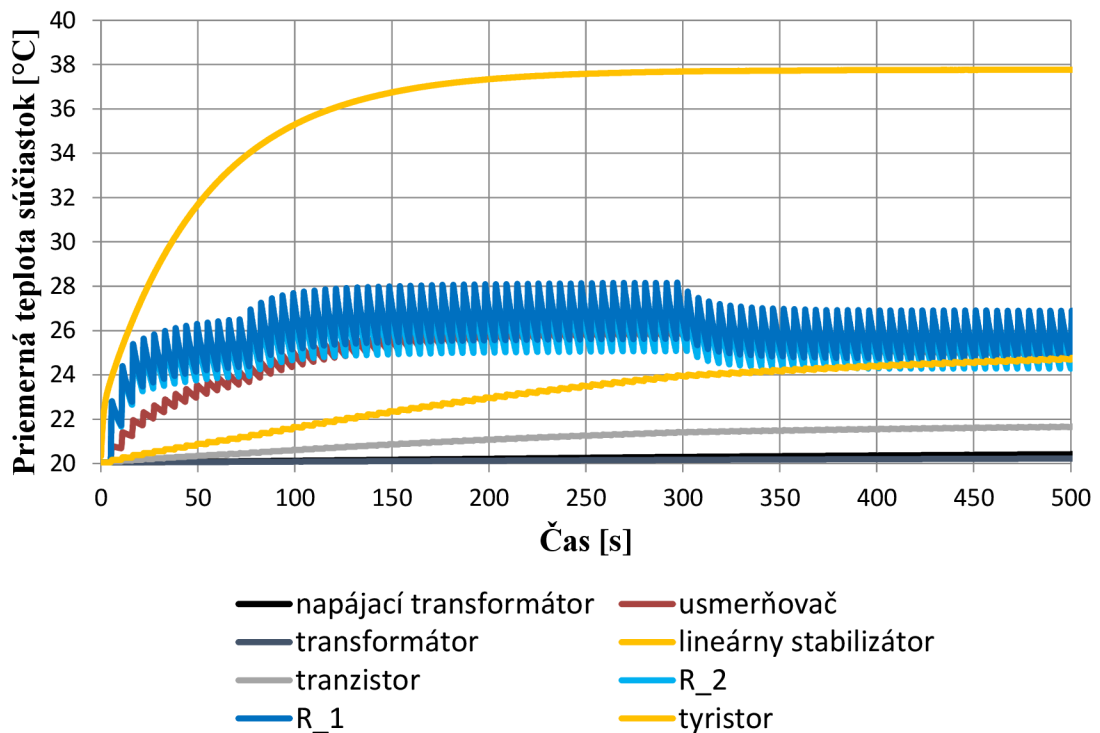
Pre zistenie prevádzkových teplôt, ktoré sa v zariadení budú pri normálnej prevádzke vyskytovať, bola vytvorená tranzientná analýza, časovo premenlivá analýza. Jej úlohou bolo simulovať stav, kedy bude prebiehať kontaktovanie článkov v bežnej prevádzke. Bola teda nastavená aktivácia komponentov, ktoré budú v procese kontaktovania výkonovo zaťažované, vid' obrázok 5.18, kde 0 zodpovedá vypnutému stavu a 1 zodpovedá zapnutému stavu, teda procesu kontaktovania. Spínací tranzistor, zrážacie rezistory, obidva transformátory a diódový usmerňovač sú aktívne a zaťažované výkonom.



Obrázok 5.18 Grafické zobrazenie periodického spínania výkonovej záťaže na komponentoch v teplotnej simulácii, 0=vypnuté, 1=zapnuté

Proces kontaktovania bol nastavený na 500 ms zvárania (reálne je táto doba kratšia, okolo 120 ms) a proces prípravy článku pred kontaktovaním (manipulačná doba) na 5 s, fyzický čas simulácie bol nastavený na 1200 s s aplikovanou podmienkou periodicity, čo by znamenalo, že sa bude kontinuálne kontaktovať približne 218 článkov po dobu 20 min.

Výsledok ilustruje obrázok 5.19, pre lepšiu orientáciu v grafe bola časová osa skrátaná na 500 s, keďže k výraznejšej zmene teploty už ďalej nedochádza a v plnom rozlíšení by bol graf neprehľadný. Teploty na konci kontaktovacieho procesu sú potom uvedené v tabuľke 5.1. Z tabuľky vyplýva, že všetky prevádzkové teploty sú v poriadku, najvyššiu teplotu dosahoval lineárny stabilizátor, avšak aj tá je v rozsahu povolených hodnôt z katalógového listu k danému komponentu.



Obrázok 5.19 Vývoj teplôt komponentov zariadenia počas časovo premenlivej teplotnej simulácie

Tabuľka 5.1 Priemerné dosiahnuté teploty na jednotlivých súčiastkach na konci kontaktovacieho procesu

komponent	jednotka	hodnota
tyristor	[°C]	25,5
R_1	[°C]	25,0
R_2	[°C]	24,5
tranzistor	[°C]	21,9
lineárny stabilizátor	[°C]	37,7
transformátor	[°C]	20,3
napájací transformátor	[°C]	20,6
usmerňovač	[°C]	24,7

5.10 Cenová kalkulácia výroby prototypu

Medzi dôležité parametre výrobku patrí aj jeho cena. Celkové nákladov na výrobu predstaveného prototypu sa skladajú z dvoch častí:

- Cena jednotlivých súčiastok a dielov
- Náklady na vývoj riadiaceho programu, a montáž komponentov

Tabuľka 5.2 poskytuje prehľad cien jednotlivých komponentov použitých v návrhu, ceny sú udávané v českých korunách a je v nich započítaná aj daň z pridanej hodnoty. Uvedené ceny sú získané z českých, slovenských a poľských internetových obchodov. Celková cena za komponenty činí 5191 Kč.

Náklady na vývoj programu a montáž komponentov pokrývajú cenu práce na stavbu konštrukcie a testovanie zariadenia. Fáza tvorby návrhu trvala päť mesiacov, ďalších päť mesiacov potom zabrala konštrukcia a testovanie zariadenia. Čistý čas práce činil 80 hodín. Pri bežnej hodinovej sadzbe 120 Kč/h by cena práce vychádzala na sumu 9600 Kč. A celková cena výrobku by činila 14791 Kč. Pre porovnanie ceny komerčne dostupných zariadení sa pohybujú medzi 3700 [46] a 87500 [47] českých korun.

Tabuľka 5.2 Cenová kalkulácia jednotlivých komponentov

Počet	Hodnota	Súčiastka	Cena za kus	Cena spolu
1		ARDUINO_NANO	288	288
1		pin konektor 1X40	7,1	7,1
2		pin konektor 2X2	3	6
14	Faston 6.3mm	Konektor Faston do DPS	1,27	17,78
14	Faston 6.3mm	Konektor Faston na kábel	2,35	32,9
5	DO35-7	1N4148	0,99	4,95
2	4N25M	4N25M	13	26
1	1M	rezistor 0309/10	1,56	1,56
1	10k	rezistor 0207/7	1,56	1,56
2	15k 3W	rezistor 0617/17	4,6	9,2
2	10k	rezistor 0204/5	1,56	3,12
1	2k2	rezistor 0207/7	1,56	1,56
5	100n	kondenzátor	1,8	9
5	150R	rezistor 0207/7	2,9	14,5
1	470uF E3.5-8	elektrolytický kondenzátor	4,1	4,1
1	470uF E5-10.5	elektrolytický kondenzátor	5,6	5,6
1	1000uF E5-10.5	elektrolytický kondenzátor	5,3	5,3
1	BC547	tranzistor BC547	2	2
2	BT151	tyristor BT151	19	38
1	43.41.7.005.2000	Relé 5V FINDER	87	87
1	IRF630	MOSFET tranzistor	23	23
2		držiak poistky 5X20mm	12	24
1	230V/6V 16VA	transformátor	419	419
1	KBU808	usmerňovač KBU808	22	22
2	220n	CX kondenzátor	6,8	13,6
2	2.2n	CY kondenzátor	3,8	7,6
1	7805TV	lineárny stabilizátor	9,5	9,5
1		dvojitá tlmivka	56	56
1	10k	odporový trimer 64W	55	55
1	UA741P	operačný zosilňovač	13	13
4		hliníkový chladič	16	64
1	EC8	výstupné konektory	288	288
1	20x4 LCD	LCD displej	208	208
1	Keyes KY-040	rotačný enkodér	34	34
1	SUNKKO 709A	zváracie pero	1625	1625
1	HAT 1000-S	prúdový snímač	1392,5	1392,5
1	RAC20-15DK	Měnič AC/DC 15V	316,5	316,5
1	92x92x25	Ventilátor DC5V	55	55
			Spolu	5190,93

6. VÝSLEDKY A TESTOVANIE

Testovanie výrobku prebiehalo v troch etapách: V prvej etape bola experimentálne overená funkčnosť každého z blokových obvodov zariadenia a taktiež aj riadiaceho programu mikrokontroléra. V druhej etape bolo testované bodovanie článkov, s nastavením fixného spínacieho uhla. Pri poslednej etape bolo skúšané bodovanie článkov, s použitím prúdového snímača a algoritmu pre automatickú reguláciu.

Testovanie obvodových častí výrobku ukázalo chyby v niektorých blokoch zariadenia, korekcie týchto chýb boli uskutočnené naddimenzovaním konkrétnych súčiastok alebo zmenou zapojenia daného obvodu.

Konkrétne zmeny prebehli pri pomocnom napájacom zdroji pre napätie 5 V. V tomto obvode bol pôvodne použitý transformátor s výstupom 12 V a za ním nasledovali dva lineárne stabilizátory, pre napätie 12 V a 5 V. Hlavným problémom bol nadmerný stratový výkon, vznikajúci na napäťovom stabilizátore pre 5 V vplyvom veľkého rozdielu vstupného a výstupného napätia stabilizátora, ktorý zapríčiňoval extrémne zvyšovanie teploty. Tento problém bol vyriešený nahradením napájacieho transformátora za transformátor s výstupným napätím iba 6 V a odstránením stabilizátora pre 12 V. Funkcie odstráneného stabilizátora prebral stabilizátor na 5 V, pretože napätie 12 V bolo použité iba na napájanie vstupného relé a chladiaceho ventilátora, ktoré mohli byť nahradené alternatívnymi dielmi s napájacím napätím 5 V. Týmto sa zmenšil stratový výkon na približnú hodnotu 1,1 W.

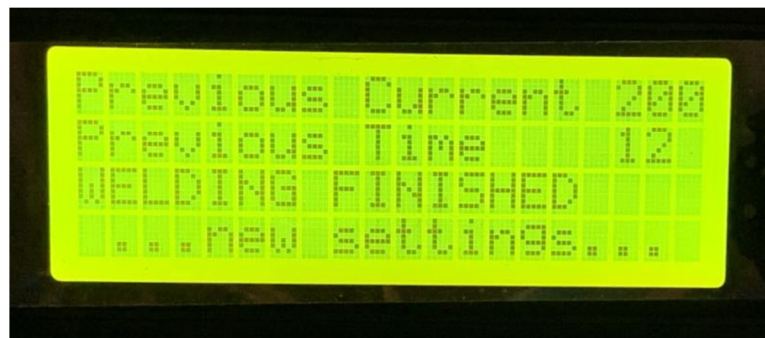
V druhej etape bola hľadaná najlepšia kombinácia viacerých premenlivých veličín: nastavenie spínacieho uhla, doby zvárania, počet závitov na sekundárnom vinutí výkonového transformátora, prítlak na zváraný článok a tvar zváracích elektród. Počas tejto etapy testovania sa ukázalo ako najvýhodnejšie zvoliť minimálnu hodnotu spínacieho uhla α , pretože pri tomto nastavení poskytuje zariadenie plný výkon. Následne bola hľadaná najkratšia doba zvárania, počas ktorej je možné vytvoriť kvalitný zváraný spoj, s ohľadom na minimálne teplotné zaťaženie článku. V tejto etape sa ako optimálna hodnota doby zvárania osvedčila hodnota $t_{req} = 100$ ms pre vrchný pól článku a pre spodný pól článku $t_{req} = 160$ ms.

V tejto časti testovania bol zároveň najlepší chod zariadenia pri použití troch závitov na sekundárnom vinutí výkonového transformátora.

Z pohľadu aplikovanej prítlačnej sily sa ukazuje ako ideálny iba slabý prítlak, pri ktorom obsluha pôsobí iba veľmi malou silou na rukoväť zváracieho pera. Prítlak je teda vytváraný takmer výhradne iba tiažovou silou zváracieho pera. V prípade použitia nadmerného prítlaku boli výsledné spojenia veľmi slabé až žiadne. Na vytvorenie prijateľného spojenia bolo nutné zväčšovať dobu zvárania a tým dochádzalo k značnému prehrievaniu článku, spojovacieho pásiku a taveniu elektród. Výstupný prúd zrejme pretekal cez veľkú plochu a spôsoboval malé oteplenie na rozhraní spojovacieho pásika a terminálu článku, ako bolo spomenuté v kapitole 5.8.

Pri poslednej etape bola hlavná úloha správne nakonfigurovať algoritmus korekcie prúdu. Praktická skúška ukázala správnu funkciu algoritmu, skúšky boli vykonané v podobe dvoch rôznych nastaveniach pracovného prúdu vid' Obrázky 6.1 a 6.2.

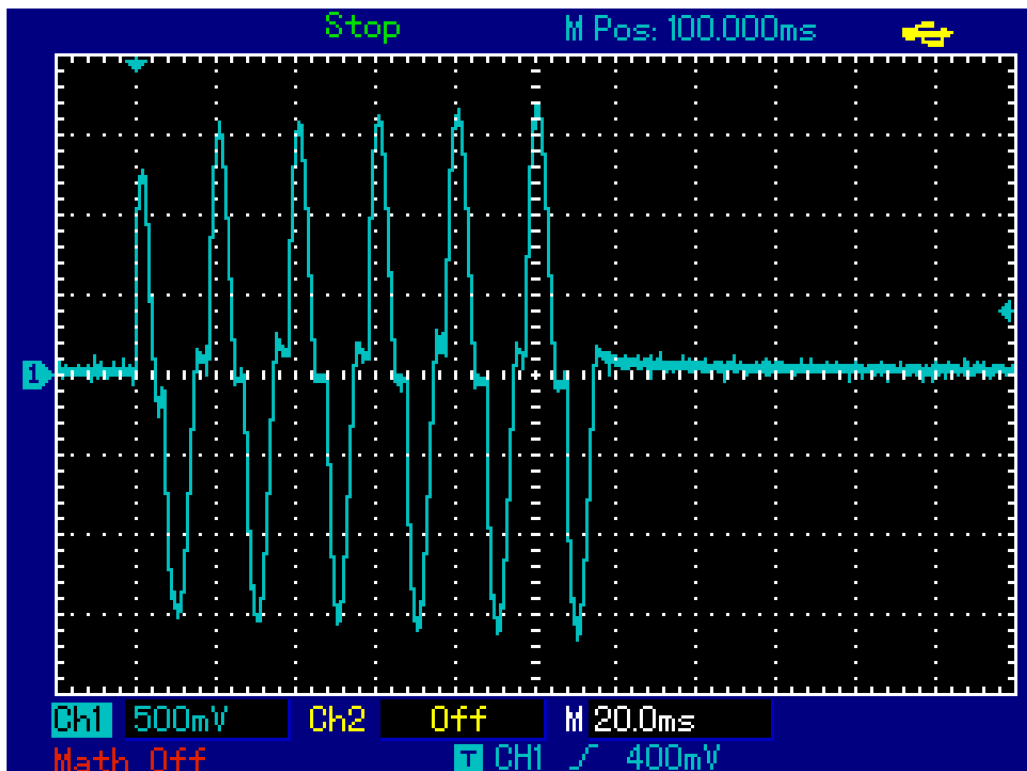
Na priebehoch získaných z osciloskopu, Obrázky 6.3 a 6.4, je viditeľné, že pri nastavenej hodnote pracovného prúdu 200 A je priebeh výstupného napätia neharmonický a zložený z viacerých častí, pričom detail na posledný pulz (Obrázok 6.4) ukazuje výsledok fázovej regulácie. Pri nastavení prúdu na 900 A (Obrázok 6.5), bol v priebehu dvoch cyklov automaticky nastavený najnižší spínací uhol, pretože pri tejto záťaži nebolo zariadenie schopné dosiahnuť požadovaný výstupný prúd. Maximálny výstupný prúd výrobku pri bodovaní bol zmeraný na 867 A, čo prevyšuje požadovanú hodnotu, preto sa priebeh výstupného napätia (Obrázok 6.5) približuje k sínusovému priebehu.



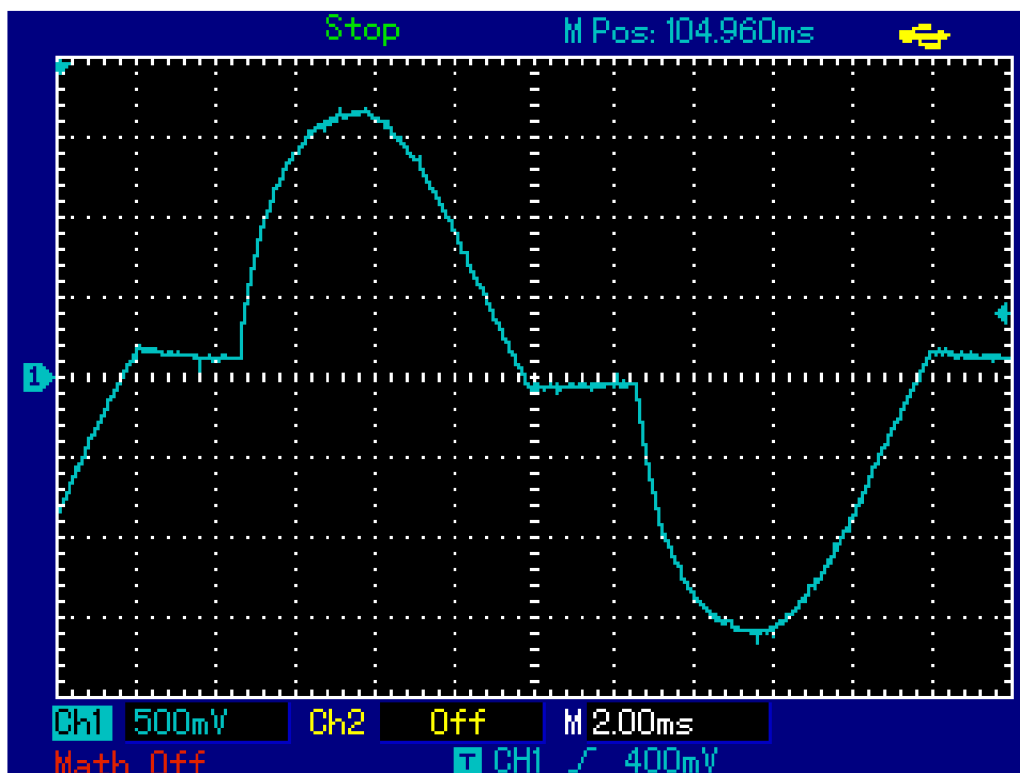
Obrázok 6.1 Nastavenie pracovného prúdu na 200 A, pri dobe zvárania 12 cyklov, čiže 120 ms



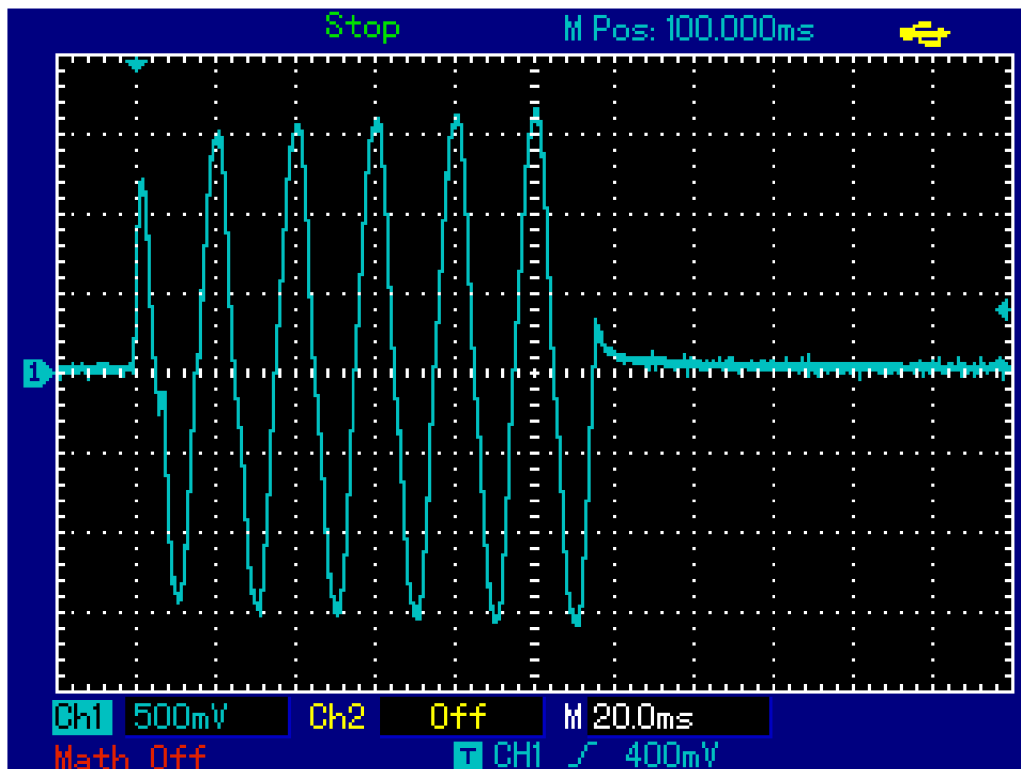
Obrázok 6.2 Nastavenie pracovného prúdu na 900 A, pri dobe zvárania 12 cyklov, čiže 120 ms



Obrázok 6.3 Priebek napätia na výstupe pri nastavení pracovného prúdu na 200 A



Obrázok 6.4 Detail na priebek posledného pulzu pri nastavení pracovného prúdu na 200 A



Obrázok 6.5 Priebeh napätia na výstupe pri nastavení pracovného prúdu na 900 A

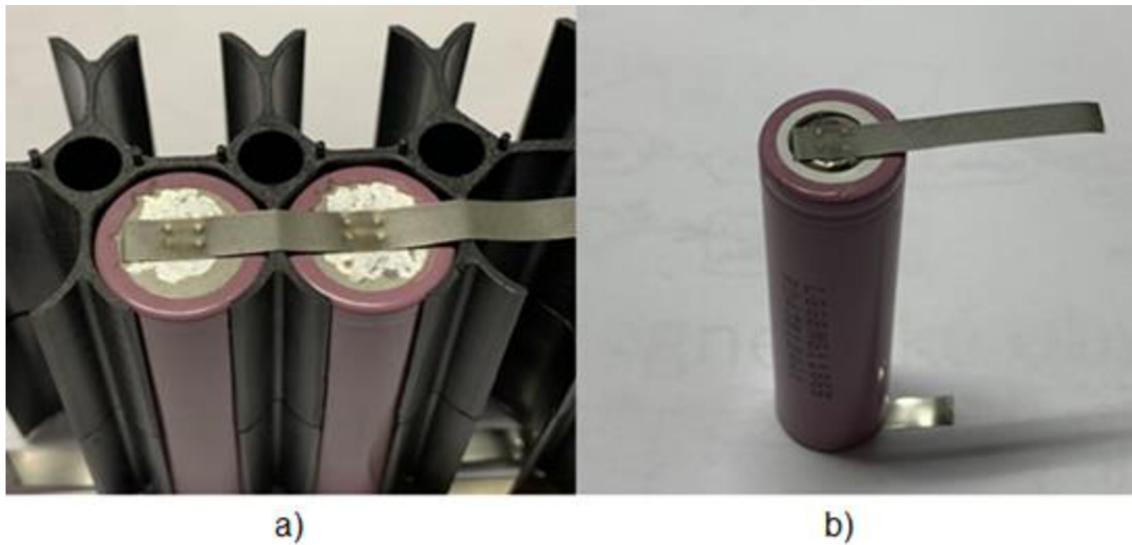
Porovnanie výsledných nakontaktovaných článkov na Obrázku 6.6 ukazuje rozdiel v kvalite vytvorených bodových spojov. V oboch prípadoch bol niklový pásik úspešne prichytený k pólu článku, pričom pri testovaní mechanickej odolnosti obstáli iba články nakontaktované s nastavením požadovaného prúdu 900 A na Obrázku 6.6 a). Článok na Obrázku 6.6 b) neprešiel testom, pretože pre odtrhnutie niklového pásika bola potrebná iba minimálna ťahová sila. Články kontaktované vyšším prúdom prešli testom vďaka veľkej ťahovej sile potrebnej k odtrhnutiu niklového pásika a skutočnosti, že aj po odtrhnutí pásik zanechal výrazné stopy na povrchu článku, čo značí kvalitný bodový spoj.

Mimo mechanickej pevnosti je taktiež dôležité teplotné zaťaženie článku pri kontaktovaní. Pri porovnávaní tohto kritéria obstál lepšie článok b), kvôli skutočnosti, že pri oboch nastaveniach boli články zaťažované počas rovnakej doby, avšak pri kontaktovaní článku b) bol pracovný prúd iba 200 A, takže stratový výkon a aj výsledná práca boli menšie ako pri kontaktovaní článkov a) prúdom 900 A.

Pri oboch prípadoch bola zmeraná teplota povrchu niklového pásika infračerveným teplomerom pár sekúnd po skončení bodovacieho procesu. Teplota na článku a) dosahovala približne 37 °C a pri článku b) 29 °C.

Na Obrázku 6.6 a) sú viditeľné tmavšie miesta na niklovom pásiku, ktoré značia mierne prehrievanie. Tomuto efektu by bolo možné predísť v prípade použitia vyššieho pracovného prúdu a kratšej doby zvárania.

Pre splnenie požiadavky vyššieho prúdu by musel byť navýšený výkon zariadenia, čo by bolo možné dosiahnuť napríklad použitím výkonnejšieho transformátora a zvýšením počtu závitov sekundárneho vinutia.



Obrázok 6.6 Nakontaktované články veľkosti 18650 pri rôznom nastavení pracovného prúdu, rovnakej doby zvarovania: a) pri 900 A, b) pri 200 A

7. ZÁVER

Cieľom tejto záverečnej práce bolo vnorenie sa do problematiky kontaktovania článkov lítiových batérií, predpokladalo sa hlavne používanie metódy odporového bodového zvárania.

Na začiatku boli predstavené základné mechanizmy prebiehajúce v Li-ion batériách a hlavné časti, z ktorých Li-ion články pozostávajú. Zároveň boli predstavené hlavné materiály používané pri výrobe Li-ion batérií. Ďalej bolo popisované všeobecné použitie lítiových batérií, rôzne typy a veľkosti vyrábaných článkov, ich vlastnosti a oblasť použitia. V závere prvej kapitoly je detailne objasnený cylindrický článok veľkosti 18560 spolu s technickými parametrami a všeobecnými vlastnosťami. Na tento konkrétny typ článku bolo cieľené použitie navrhovaného konceptu kontaktovačky.

Ďalej boli objasnené základy procesov kontaktovania článkov a hlavné problémy, ktorým je potrebné predísť. Boli opísané štyri základné metódy vykonávania procesu kontaktovania článkov, ich vlastnosti a aplikácie použitia. Ku koncu tejto kapitoly boli všetky rozoberané metódy zhrnuté a navzájom porovnané z hľadiska minimálnych prechodových odporov a minimálneho teplotného namáhania článku, ktoré je schopná každá z metód dosiahnuť.

V hlavnej časti bolo predstavené kompletne riešenie návrhu konštrukcie odporovej bodovej zväračky s reguláciou prúdu. Postupne boli zdokumentované a opísané jednotlivé obvodové bloky zhotoveného zariadenia. Bol vyvinutý jednoduchý algoritmus pre reguláciu amplitúdy výstupného prúdu na princípe hľadania správnej hodnoty spínacieho uhlu tyristorového regulátora. Algoritmus využíva metódu iterácií a upravuje spínací uhol pri každej polvlne.

Ďalej bolo stručne predstavené ovládacie rozhranie zhotoveného výrobku, kde boli objasnené základné inštrukcie nutné pre prevádzku vytvoreného zariadenia. Následne sú vysvetlené výhody a nevýhody tvaru elektród a aplikovanej prítlačnej sily na elektródy. Na konci kapitole je opísaná mechanická konštrukcia zariadenia, teplotné pomery vo vnútri zariadenia, ktoré sú očakávané počas prevádzky a fotografia hotového výrobku.

V poslednej kapitole je opísané praktické testovanie prototypu zariadenia na Li-ion článkoch veľkosti 18650. Spolu s testovaním prebehlo aj meranie výstupného prúdu a priebehu výstupného napätia, ktoré je taktiež spomenuté v tejto kapitole. Toto praktické testovanie dokazuje, že návrh konceptu je funkčný a vhodný pre kontaktovanie batériových článkov veľkosti 18650.

Predstavený výrobok vyniká svojou unikátnosťou, pretože ponúka možnosť presného nastavenia hodnoty pracovného prúdu a vďaka spätnej väzbe aj automatickú reguláciu. Táto funkcia umožňuje kontaktovanie širokého spektra veľkostí a typov batériových článkov, pretože každá z veľkostí vyžaduje iné parametre kontaktovania. Okrem toho využíva pre svoju prevádzku tyristorovú reguláciu, ktorá prináša výhody nízkeho

tepelného stratového výkonu, jednoduchú konštrukciu a lacné komponenty ktoré je možné jednoducho nahradiť v prípade poruchy.

Pri porovnaní nákladov na výrobu predstaveného zariadenia a cenou komerčne dostupných produktov sú najlacnejšie komerčné produkty výhodnejšie ako spomínané zariadenie. Taktiež čas strávený návrhom, testovaním, korekciou a celkovo stavbou prototypu je mnohonásobne väčší ako čas výroby jedného komerčného výrobku. Komerčne vyrábané zariadenia totiž môžu využívať výhody úspor z rozsahu pri hromadnej výrobe a množstevné zľavy pri nákupe súčiastok, čo pri výrobe zariadenia pre účely tejto práce nebolo možné.

Komerčné produkty bežne nevyužívajú typ riešenia predstavený v tejto práci, toto riešenie vyniká možnosťou ďalších modifikácií a ďalšieho vývoja, či už zmenou hardvérových alebo softvérových častí. Zariadenie bude slúžiť vo vývoji ako podpora pre iné projekty využívajúce batériové články, ktoré je potrebné nakontaktovať.

LITERATÚRA

- [1] Solutions in Battery Technology Testing. *H.E.L Group Manufacturer of Scientific Instruments and Software* [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://helgroup.com/applications/solutions-in-battery-technology-testing/>
- [2] LIU, Chaofeng, Zachary G. NEALE a Guozhong CAO. Understanding electrochemical potentials of cathode materials in rechargeable batteries. *Materials Today* [online]. 2016, **19**(2), 109-123 [cit. 2021-12-15]. ISSN 13697021. Dostupné z: doi:10.1016/j.mattod.2015.10.009
- [3] KONG, Lingxi a Michael PECHT. A Look Inside Your Battery: Watching the Dendrites Grow. *Battery Power Online* [online]. 24 August 2020 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.batterypoweronline.com/news/a-look-inside-your-battery-watching-the-dendrites-grow/>
- [4] NITTA, Naoki, Feixiang WU, Jung Tae LEE a Gleb YUSHIN. Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today* [online]. 2015, **18**(5), 252-264 [cit. 2021-12-15]. ISSN 13697021. Dostupné z: doi:10.1016/j.mattod.2014.10.040
- [5] Lithium Titanate (LTO) Cells - Technical Advantages. *Battery and Solar distributor in EU* [online]. Praha: GWL, 2021 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://shop.gwl.eu/LTO-Tech/>
- [6] MASSÉ, Robert C., Chaofeng LIU, Yanwei LI, Liqiang MAI a Guozhong CAO. Energy storage through intercalation reactions: electrodes for rechargeable batteries. *National Science Review* [online]. 2017, 4(1), 26-53 [cit. 2021-12-15]. ISSN 2095-5138. Dostupné z: doi:10.1093/nsr/nww093
- [7] HERRMANN, Matthias. *Packaging - Materials review* [online]. 2014, , 121-133 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: doi:10.1063/1.4878483
- [8] GULZAR, Umair, Subrahmanyam GORIPARTI, Ermanno MIELE, et al. Next-generation textiles: from embedded supercapacitors to lithium ion batteries. *Journal of Materials Chemistry A* [online]. 2016, **4**(43), 16771-16800 [cit. 2021-12-15]. ISSN 2050-7488. Dostupné z: doi:10.1039/C6TA06437J
- [9] BUCHMANN, Isidor. BU-304: Why are Protection Circuits Needed? *Battery University* [online]. Coalescent Design, 2021, 25 October 2021 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-304-why-are-protection-circuits-needed>
- [10] Tesla Battery Technology and its Application in other Industries. *Industrial Heaters Wattco* [online]. Wattco, 2021 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: https://1lw1tk46gr9aum2ilzzghvk5-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2021/01/shutterstock_768998659-scaled.jpg

- [11] BUDDE-MEIWES, Heide, Julia DRILLKENS, Benedikt LUNZ, Jens MUENNIX, Susanne ROTHGANG, Julia KOWAL a Dirk Uwe SAUER. A review of current automotive battery technology and future prospects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* [online]. 2013, **227**(5), 761-776 [cit. 2021-12-15]. ISSN 0954-4070. Dostupné z: doi:10.1177/0954407013485567
- [12] IDELAH, Imad. Li-ion Cell Types. *Inventus Power - Global Leader in Advanced Battery Systems* [online]. USA: Inventus Power, 2021, 26 June 2020 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://news.inventuspower.com/blog/li-ion-cell-types>
- [13] Cylindrical Vs Prismatic Cells. *ChargeX Lithium Ion Batteries* [online]. USA: Lunasoft, 2021 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.lithiumion-batteries.com/cylindrical-vs-prismatic-cells.php>
- [14] VANZWOL, Jeffrey. The Lithium-Ion Cells and Chemistries You Need to Know. *Electronic Design* [online]. Endeavor Business Media, 2021, 18 March 2021 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.electronicdesign.com/power-management/whitepaper/21156693/green-cubes-technology-the-lithiumion-cells-and-chemistries-you-need-to-know>
- [15] Lithium Polymer vs Lithium-Ion batteries: What's the deal? *Scotties Tech.Info* [online]. 2009, 21 June 2015 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://scottiestech.info/2015/06/21/lithium-polymer-vs-lithium-ion-batteries-whats-the-deal/>
- [16] MAHARAJ, Franklin D. R., Wanxin WU, Yiwei ZHOU, Logan T. SCHWANZ a Michael P. MARSHAK. Exploring Real-World Applications of Electrochemistry by Constructing a Rechargeable Lithium-Ion Battery. *Journal of Chemical Education* [online]. 2019, **96**(12), 3014-3017 [cit. 2021-12-15]. ISSN 0021-9584. Dostupné z: doi:10.1021/acs.jchemed.9b00328
- [17] Trend BAT/CR2032/3V Battery CR2032 3v. *FFX* [online]. FFX, 2021 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://img.ffx.co.uk/tools/bat-cr2033-3v.jpg?w=1200&height=960&scale=both>
- [18] SAMSUNG 25R - 18650 BATTERY. *18650* [online]. 2021 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.18650.uk/samsung-25r-18650-battery>
- [19] PANASONIC/NCR-18650 (2900). *Omnitron* [online]. Praha, 2019 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: https://www.omnitron.cz/ps/galerie/792019122953866/es_ncr-18650-2900-b.png
- [20] Nabíjecí průmyslová baterie 18650 Panasonic 3400mAh 3,7V Li-Ion. *T.S.BOHEMIA* [online]. Olomouc: CyberSoft, 2021 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: https://interlink-static3.tsbohemia.cz/nabijeci-prumyslova-baterie-18650-panasonic-3400mah-3-7v-li-ion_ien293515.jpg
- [21] BRAND, Martin J., Philipp A. SCHMIDT, Michael F. ZAEH a Andreas JOSSEN. Welding techniques for battery cells and resulting electrical contact resistances. *Journal of Energy Storage* [online]. 2015, 1, 7-14 [cit. 2021-11-22]. ISSN 2352152X. Dostupné z: doi:10.1016/j.est.2015.04.001

- [22] LEE, S. Shawn, Tae H. KIM, S. Jack HU, Wayne W. CAI a Jeffrey A. ABELL. Joining Technologies for Automotive Lithium-Ion Battery Manufacturing: A Review. ASME 2010 International Manufacturing Science and Engineering Conference, Volume 1 [online]. ASMEDC, 2010, 2010-01-01, , 541-549 [cit. 2021-12-14]. ISBN 978-0-7918-4946-0. Dostupné z: doi:10.1115/MSEC2010-34168
- [23] PLÍVA, Ladislav. *Odporové svařování*. Praha: SNTL, 1975, 265 s.
- [24] Resistance Spot Welding. *AMADA WELD TECH* [online]. Southern California, 2021 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://amadaweldtech.com/technical-glossary/resistance-spot-welding/>
- [25] Weld Nugget defined. *AMADA WELD TECH* [online]. Southern California, 2021 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://amadaweldtech.com/technical-glossary/weld-nugget/>
- [26] Battery Pack Manufacturing. *Specialist Battery Suppliers & Manufacturers UK* [online]. Telford, 2021 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: https://www.aceongroup.com/wp-content/uploads/2020/02/Template__InternalPage-Hero.jpg
- [27] NAEEM, Mohammed. Fiber Laser Welding Assists Longer Battery Life for EVs. *SME* [online]. 2021, 18 June 2018 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://www.sme.org/globalassets/sme.org/technologies/articles/2018/06---june/photo-1-laser-welding-768x865.jpg>
- [28] Battery Welding: Using Lasers for Battery Tab Welding Applications. *AMADA WELD TECH* [online]. Southern California, 2021 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://images-cdn.amadaweldtech.com/f00000000031197/amadaweldtech.com/wp-content/uploads/2015/11/5136-1200x590.jpg>
- [29] Battery cell connector Cu/Ni coated and 10 μm Cu foils. *TELSONIC AG - The Powerhouse of Ultrasonics* [online]. Telsonic, 2021 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: https://www.telsonic.com/uploads/tx_templavoila/2_Battery_cell_connector_2xAl__025mm-layer_nickel_plate.jpg
- [30] Cylindrical battery contact. *TELSONIC AG - The Powerhouse of Ultrasonics* [online]. Telsonic, 2021 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: https://www.telsonic.com/uploads/tx_templavoila/1_Battery_cap_round_Cu_Al_1_rgb.jpg
- [31] Resistance Welding and Crimp & Solder Methods Use More Energy and Production Materials than Ultrasonic Welding. Sonobond Ultrasonics [online]. 2021 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://livesonobond-18ca1.kxcdn.com/images/content/ultrasonic-wedge-reed-bonding-system.jpg>

- [32] Prismatic Battery Pack Laser Spot Welder , Automatic Laser Welding Equipment 1000*80mm. *Quality Lithium Battery Spot Welder & 18650 Battery Spot Welder factory from China* [online]. China, 2019 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: https://www.lithiumbattery-spotwelder.com/photo/pl32990672-prismatic_battery_pack_laser_spot_welder_automatic_laser_welding_equipment_1000_80mm.jpg
- [33] HD-2119 Precision Spot Welder 18650 32650 / 380V 5000A Inverter Spot Welder. *Quality Lithium Battery Spot Welder & 18650 Battery Spot Welder factory from China* [online]. China, 2019 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: https://www.lithiumbattery-spotwelder.com/photo/pl32990554-hd_2119_precision_spot_welder_18650_32650_380v_5000a_inverter_spot_welder.jpg
- [34] Arduino Nano — Arduino Official Store. *Arduino Official Store* [online]. Arduino, 2021 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>
- [35] Arduino Nano Every, originál. *LASKARDUINO.cz* [online]. Rychnov nad Kněžnou: Shoptet, 2021 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: https://cdn.myshoptet.com/usr/www.laskarduino.cz/user/shop/big/5946_abx00028-iso.jpg?6137b46c
- [36] Stop Tlačítko Bezpečnostní 660V 10A. *Dratek.cz: VELKOOBCHOD, MALOOBCHOD S ARDUINEM* [online]. Havlíčkův Brod: ECLIPSERA, 2021 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: https://dratek.cz/photos/produkty_gal/f/3/3275.jpg?m=1502871517
- [37] IIC I2C Display LCD 1602 16X2 Znaků LCD Modul Modrý. *Dratek.cz: VELKOOBCHOD, MALOOBCHOD S ARDUINEM* [online]. Havlíčkův Brod: ECLIPSERA, 2021 [cit. 2021-12-13]. Dostupné z: https://dratek.cz/photos/produkty_gal/f/3/3118.jpg?m=1502871455
- [38] Spot Welding Machine Control Board. *AliExpress - Online Shopping* [online]. 2010 [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://ae01.alicdn.com/kf/Hf9612b2c10bb48b8b491ce5c9fb6e52eK.jpg>
- [39] SUNKKO® 70-B Mobile Welding Pen 'O' Type Connector - Sunkko. *Sunkko.net* [online]. Sunkko, 2022 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: https://cdn11.bigcommerce.com/s-dj1lhanvaq/images/stencil/1280x1280/products/129/1012/3__35529.1628146959.jpg?c=2
- [40] MASOMTOB, Manop, Rawitat SUKONDHASINGHA, Jan BECKER a Dirk Uwe SAUER. Parametric Study of Spot Welding between Li-ion Battery Cells and Sheet Metal Connectors. *Engineering Journal* [online]. 2017, **21**(7), 457-473 [cit. 2022-05-04]. ISSN 01258281. Dostupné z: doi:10.4186/ej.2017.21.7.457
- [41] LETTL, Jiří, Jiří PAVELKA a Jan BAUER. *Výkonová elektronika*. 4. přepracované vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2019, 226 stran : ilustrace ; 30 cm. ISBN 978-80-01-06514-3.

- [42] Patočka M.: Výkonová elektronika, 1. část - usměrňovače, střídavé měniče napětí, skriptum FEKT, Brno, 2010 (CS)
- [43] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [44] MOHAN, Ned, Tore UNDELAND a William P ROBBINS. *Power electronics: converters, applications and design*. Media enhanced third edition. Hoboken: John Wiley, 2003, xvii, 802 stran : ilustrace ; 26 cm 1 CD ROM. ISBN 978-0-471-22693-2.
- [45] HAT 1000-S - Proudový snímač 2.5 kA \pm 4V, LEM. *Distrelec Česká republika: Distributor Elektronických Komponentů* [online]. Distrelec, 2022 [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://www.distrelec.cz/cs/proudovy-snimac-ka-4v-lem-hat-1000/p/17696292>
- [46] VEVOR 2 In 1 788h Dual Pulse Spot Welder Battery Welding Machine+18650 Battery Charger. *VEVOR* [online]. VEVOR, 2009 [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: https://eur.vevor.com/spot-welder-c_10076/2-in-1-788h-dual-pulse-spot-welder-battery-welding-machine-18650-battery-charger-p_010746645719
- [47] HGVVNM 737g+ 4.3kw Spot Welding Machine for 18650 Batteries Nickel Strip Connection Battery Spot Welder High Power Welding Pen. *Amazon* [online]. 19 Feb 2022 [cit. 2022-05-30]. Dostupné z: https://www.amazon.co.uk/Welding-Machine-Batteries-Connection-Battery/dp/B09SWLN1XY/ref=sr_1_46

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

A/D	analógovo-digitálny prevodník
AC/DC	menič striedavého prúdu na jednosmerný prúd
DPS	doska plošných spojov
EMC	elektromagnetická kompatibilita
I2C	dvojvodičová obojsmerná synchronná zbernica
Li-ion	Lítium iónové
Li-pol	Lítium polymérové
ND:YAG laser	laser s neodýmom dopovaným monokryštálom Y3Al6O12
RL	obvod s rezistorom a cievkou

Symboly:

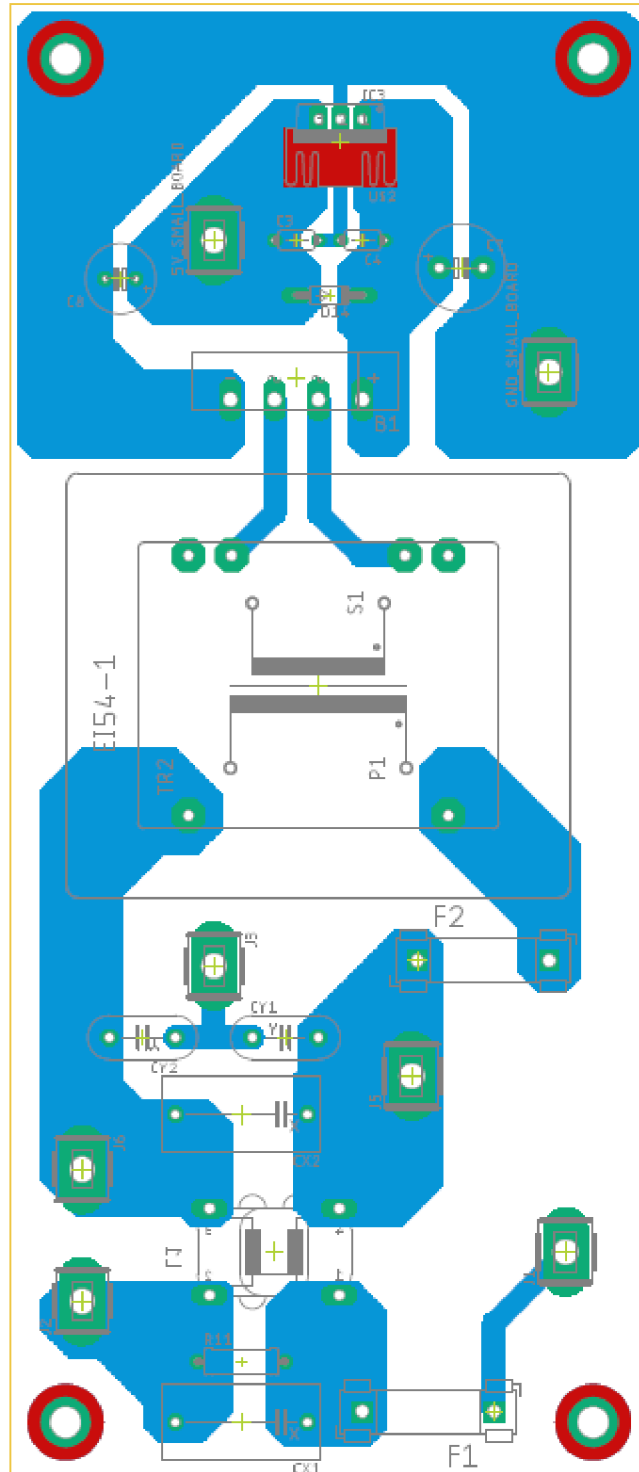
B_{Max}	magnetická indukcia	(T)
f	frekvencia	(Hz)
I_1	prúd primárnym vinutím	(A)
I_2	prúd sekundárnym vinutím	(A)
I_G	budiaci prúd tyristora	(A)
I_{out}	zmeraná amplitúda zväracieho prúdu	(A)
I_R	odkláňaný prúd budenia tyristora	(A)
I_{req}	požadovaná amplitúda zväracieho prúdu	(A)
i_z	výstupný prúd pri fázovej regulácii	(A)
K	transformačný pomer	(-)
m_{Fe}	hmotnosť železného jadra transformátora	(kg)
N_1	počet závitov primárneho vinutia	(závit)
N_2	počet závitov sekundárneho vinutia	(závit)
N_p	počet závitov vinutia impulzného transformátora	(závit)
P_{Cu}	výkonové straty vo vinutí transformátora	(W)
P_{Cu_pri}	výkonové straty v primárnom vinutí	(W)
P_{Cu_sek}	výkonové straty vo sekundárnom vinutí	(W)
P_{Fe}	výkonové straty v železnom jadre transformátora	(W)
R_1	rezistor napät'ového deliča	(Ω)
R_{GK}	rezistor napät'ového deliča	(Ω)
R_{pri}	odpor primárneho vinutia transformátora	(Ω)
R_{sek}	odpor sekundárneho vinutia transformátora	(Ω)
s	strieda	(-)
S_{Fe}	prierez jadra impulzného transformátora	(m ²)
t_{req}	požadovaná doba zvärania	(ms)

U_1	napätie primárneho vinutia	(V)
u_1	vstupné napätie pri fázovej regulácii	(V)
U_2	napätie sekundárneho vinutia	(V)
U_3	výstupné usmernené napätie budiča tyristorov	(V)
U_d	napájacie napätie budiaceho meniča tyristorov	(V)
U_{GK}	napätie riadiacej elektródy tyristora	(V)
U_{vst}	výstupné napätie prúdového snímača	(V)
$U_{výst}$	výstupné napätie prevodníka pre prúdový snímač	(V)
u_z	výstupné napätie pri fázovej regulácii	(V)
Z_{Fe}	merné straty v železnom jadre transformátora	(W/kg)
α	spínací uhol tyristorov pri fázovej regulácii	(°)
τ	časová konštanta pri RL obvode	(s)
φ	fázový posun prúdu voči napätiu	(°)

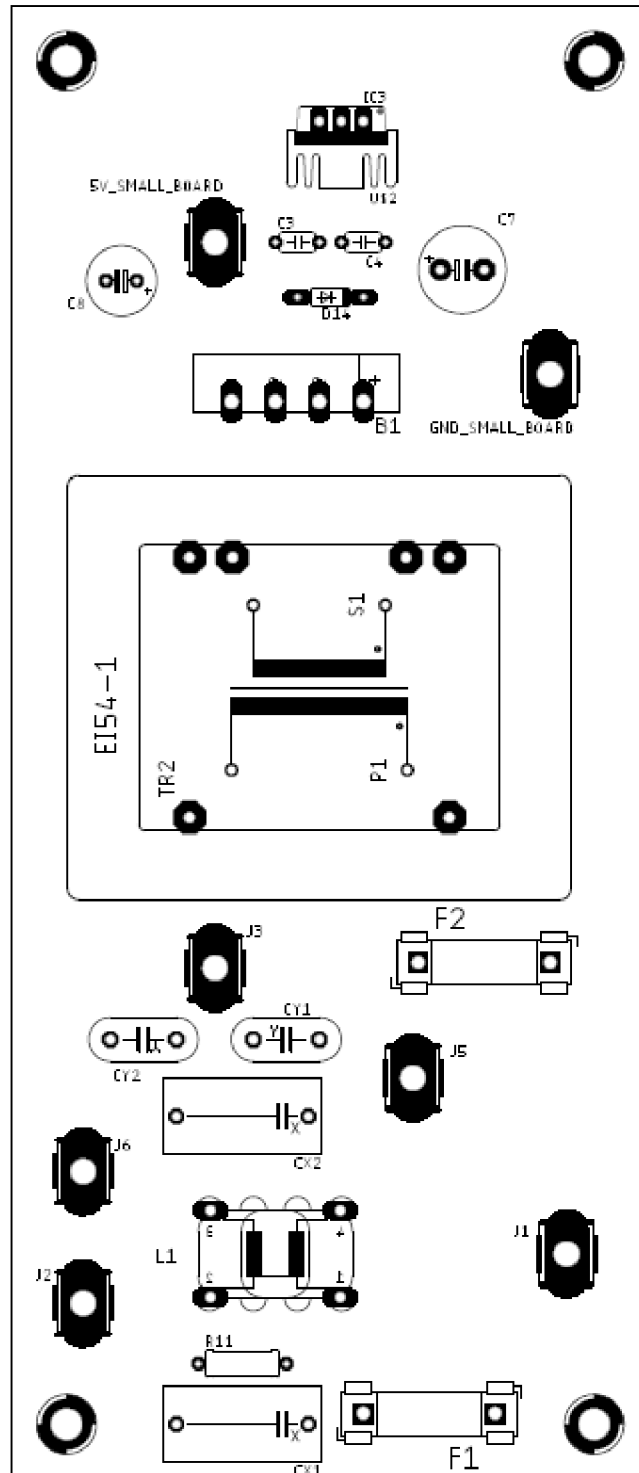
ZOZNAM PRÍLOH

PRÍLOHA A - DPS EMC FILTRA A POMOCNÉHO ZDROJA.....	59
PRÍLOHA B - OSADZOVACÍ PLÁN PRE DPS EMC FILTRA A POMOCNÉHO ZDROJA	60
PRÍLOHA C - PREDLOHA PRE DPS EMC FILTRA A POMOCNÉHO ZDROJA	61
PRÍLOHA D - ZOZNAM SÚČIASTOK PRE DPS EMC FILTRA A POMOCNÉHO ZDROJA...	62
PRÍLOHA E - DPS VÝKONOVEJ ČASTI A RIADENIA.....	63
PRÍLOHA F - OSADZOVACÍ PLÁN PRE DPS VÝKONOVEJ ČASTI A RIADENIA	64
PRÍLOHA G - PREDLOHA PRE DPS VÝKONOVEJ ČASTI A RIADENIA	65
PRÍLOHA H - ZOZNAM SÚČIASTOK PRE DPS VÝKONOVEJ ČASTI A RIADENIA ČASŤ 166	166
PRÍLOHA I - ZOZNAM SÚČIASTOK PRE DPS VÝKONOVEJ ČASTI A RIADENIA ČASŤ 2	67
PRÍLOHA J - DPS A OSADZOVACÍ PLÁN PRE PREVODNÍK PRE PRÚDOVÝ SNÍMAČ	68
PRÍLOHA K - PREDLOHA A ZOZNAM SÚČIASTOK PRE DPS PREVODNÍKA PRE PRÚDOVÝ SNÍMAČ	69
PRÍLOHA L - ZDROJOVÝ KÓD PROGRAMU.....	70
PRÍLOHA M - TECHNICKÝ VÝKRES KRYCEJ KONŠTRUKCIE.....	71

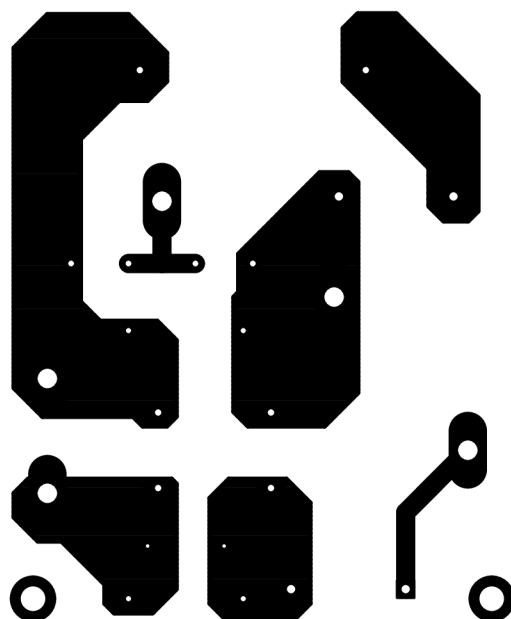
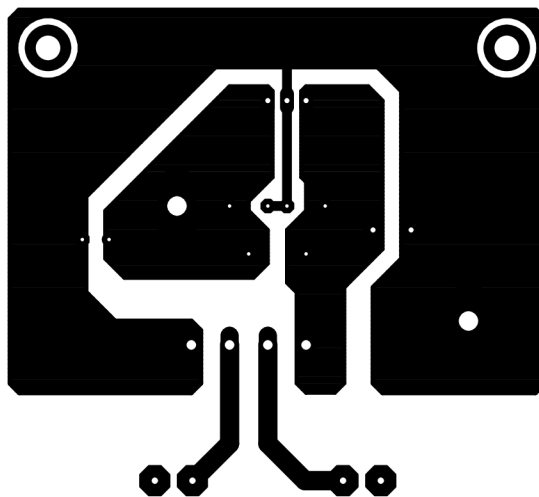
Príloha A - DPS EMC filtra a pomocného zdroja



Príloha B - Osadzovací plán pre DPS EMC filtra a pomocného zdroja



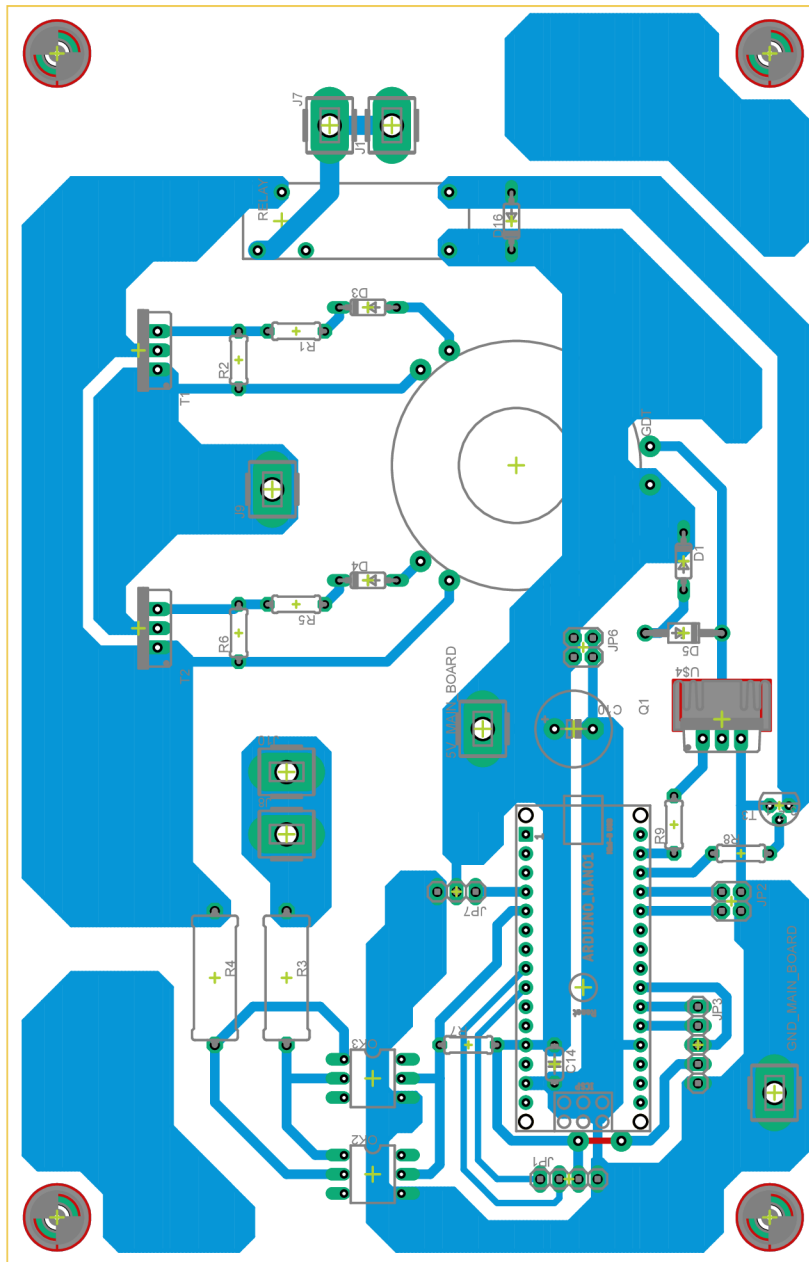
Príloha C - Predloha pre DPS EMC filtra a pomocného zdroja



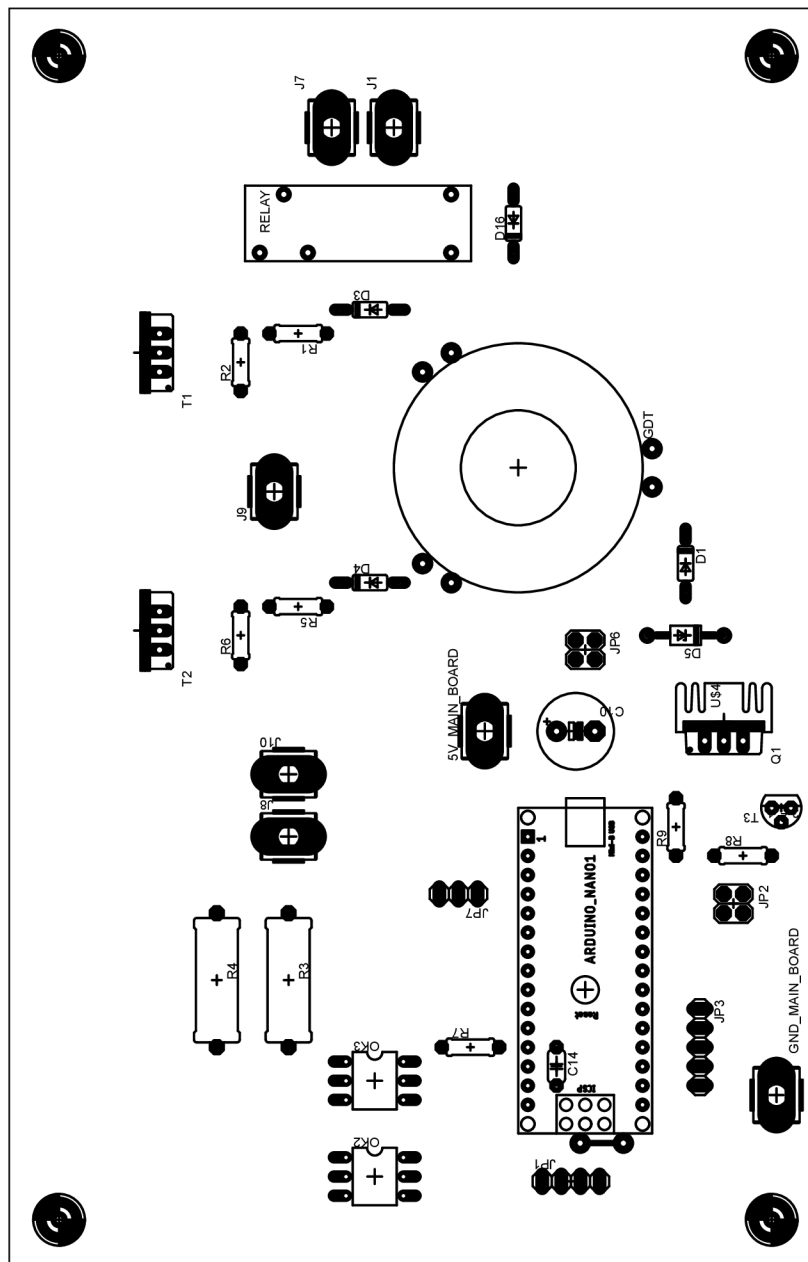
Príloha D - Zoznam súčiastok pre DPS EMC filtra a pomocného zdroja

Súčiastka	Hodnota	Puzdro Eagle	Popis
5V_SMALL_BOARD	6.3mm	62221	Faston konektor
B1		KBU	usmerňovač
C3	100n	C050-024X044	kondenzátor
C4	100n	C050-024X044	kondenzátor
C7	470uF	E5-10,5	kondenzátor
C8	470uF	E3,5-8	kondenzátor
CX1	220n	XC15B8	kondenzátor
CX2	220n	XC15B8	kondenzátor
CY1	2.2n	YC7B5	kondenzátor
CY2	2.2n	YC7B5	kondenzátor
D14	1N4148	DO35-7	dióda
F1		5X20MM	držiak poistky
F2		5X20MM	držiak poistky
GND_SMALL_BOARD	6.3mm	62221	Faston konektor
IC3	7805TV	TO220V	lineárny stabilizátor
J1	6.3mm	62221	Faston konektor
J2	6.3mm	62221	Faston konektor
J3	6.3mm	62221	Faston konektor
J5	6.3mm	62221	Faston konektor
J6	6.3mm	62221	Faston konektor
L1			tlmivka
R11	1M	0309/10	vybíjací rezistor
TR2		EI54-1	transformátor

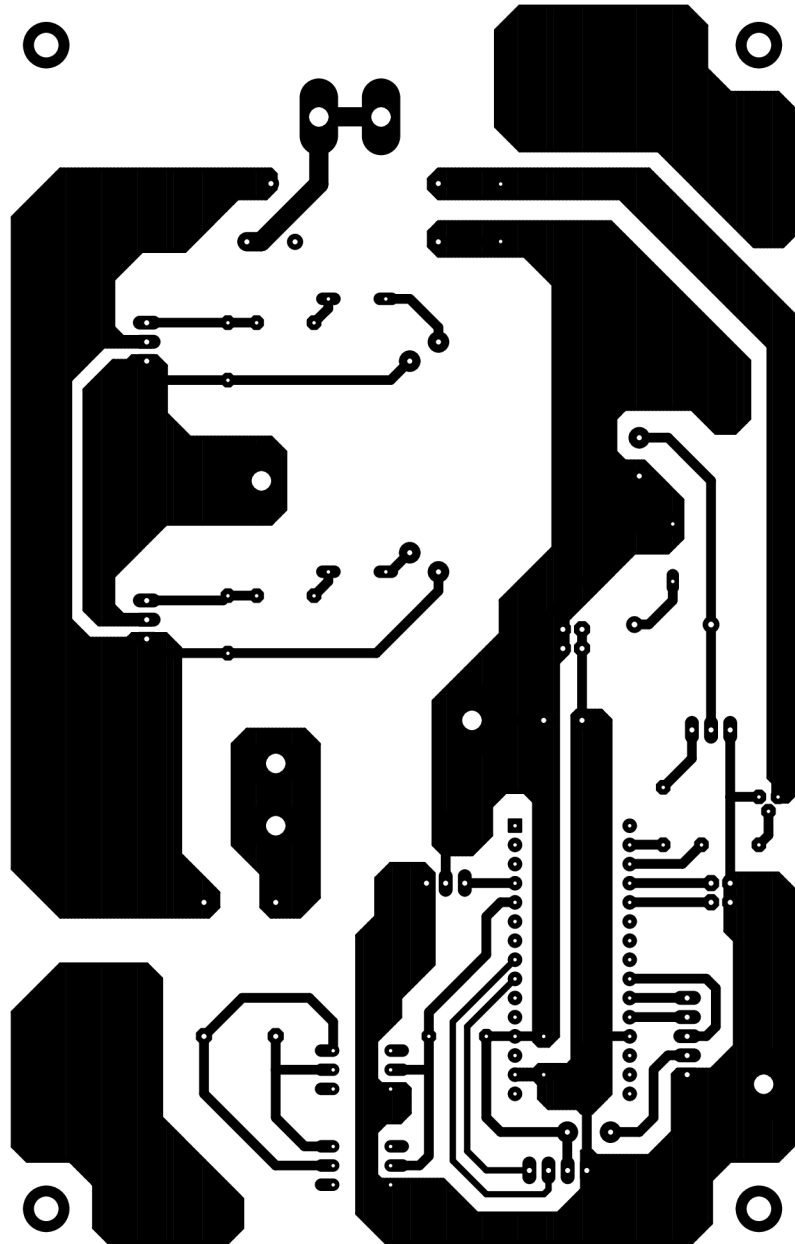
Príloha E - DPS výkonovej časti a riadenia



Príloha F - Osadzovací plán pre DPS výkonovej časti a riadenia



Príloha G - Predloha pre DPS výkonovej časti a riadenia



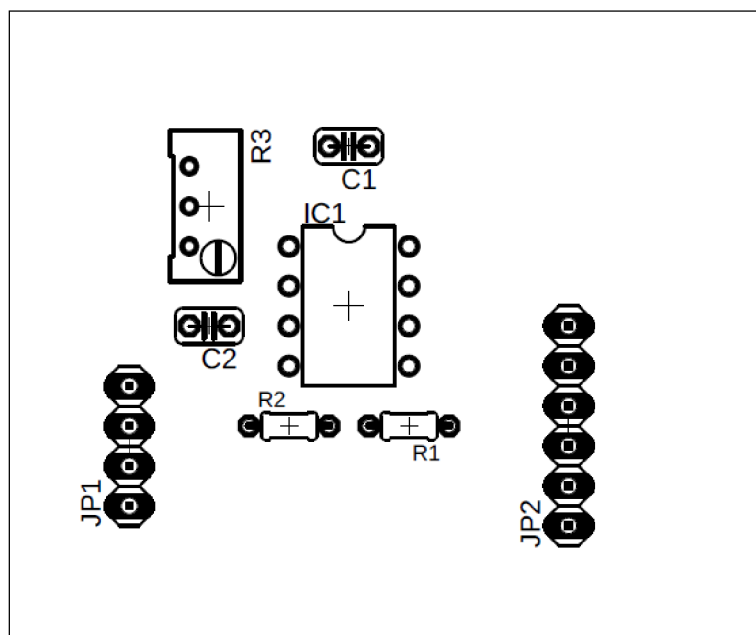
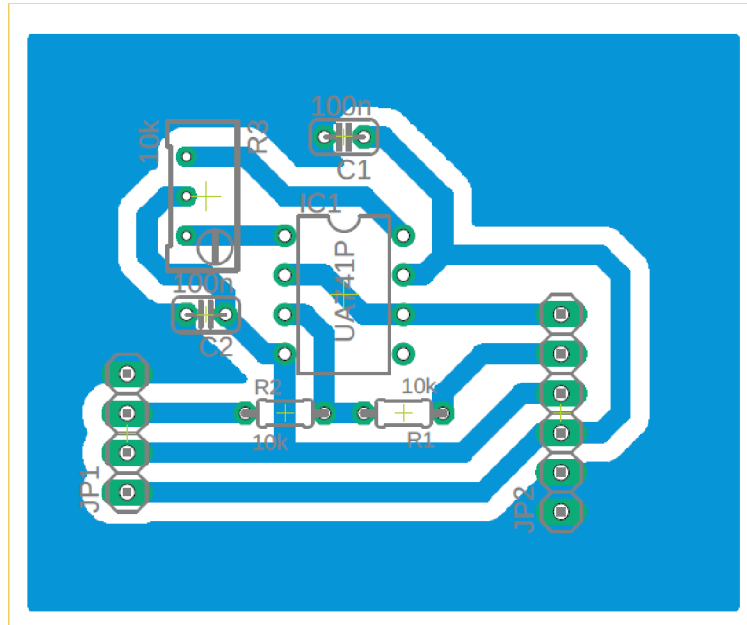
Príloha H - Zoznam súčiastok pre DPS výkonovej časti a riadenia časť 1

Súčiastka	Hodnota	Puzdro EAGLE	Popis
5V_MAIN_BOARD	6.3mm	62221	Faston konektor
ARDUINO_NANO1		ARDUINO_NANO	Arduino Nano
C10	1000uF	E5-10,5	kondenzátor
C14	100n	C050-024X044	kondenzátor
D1	1N4148	DO35-7	dióda
D3	1N4148	DO35-7	dióda
D4	1N4148	DO35-7	dióda
D5	5.6V	DO41Z10	dióda
D16	1N4148	DO35-7	dióda
GDT		DOUBLE	budiaci transformátor
GND_MAIN_BOARD	6.3mm	62221	Faston konektor
J1	6.3mm	62221	Faston konektor
J7	6.3mm	62221	Faston konektor
J8	6.3mm	62221	Faston konektor
J9	6.3mm	62221	Faston konektor
J10	6.3mm	62221	Faston konektor
JP1		1X04	pin konektor
JP2		2X02	pin konektor
JP3		1X05	pin konektor
JP6		2X02	pin konektor
JP7		1X03	pin konektor
OK2	4N25M	DIL06	optočlen
OK3	4N25M	DIL06	optočlen
Q1	IRF630	TO220BV	MOSFET tranzistor

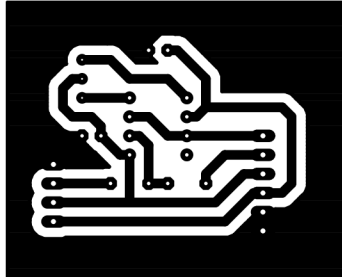
Príloha I - Zoznam súčiastok pre DPS výkonovej časti a riadenia časť 2

Súčiastka	Hodnota	Puzdro EAGLE	Popis
R1	150R	0207/7	rezistor
R2	150R	0207/7	rezistor
R3	15k 3W	0617/17	rezistor
R4	15k 3W	0617/17	rezistor
R5	150R	0207/7	rezistor
R6	150R	0207/7	rezistor
R7	10k	0207/7	rezistor
R8	2k2	0207/7	rezistor
R9	150R	0207/7	rezistor
RELAY	FINDER-43.41.7.005.3000	FINDER-43.41	relé
T1	BT151	TO220V	tyristor
T2	BT151	TO220V	tyristor
T3	BC547	TO92	tranzistor

Príloha J - DPS a osadzovací plán pre prevodník pre prúdový snímač



Príloha K - Predloha a zoznam súčiastok pre DPS prevodníka pre prúdový snímač



Súčiastka	Hodnota	Puzdro EAGLE	Popis
C1	100n	C025-024X044	kondenzátor
C2	100n	C025-024X044	kondenzátor
IC1	UA741P	DIL08	operačný zosilňovač
JP1		1X04	pin konektor
JP2		1X06	pin konektor
R1	10k	0204/5	rezistor
R2	10k	0204/5	rezistor
R3	10k	RTRIM64W	rezistor

Príloha L - Zdrojový kód programu

Zdrojový kód programu je uložený na priloženom CD nosiči.

Príloha M - Technický výkres krycej konštrukcie

Technické výkresy jednotlivých dielov krycej konštrukcie zariadenia sú uložené na priloženom CD nosiči.