



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY

NABÍJEČKA LITHIOVÝCH AKUMULÁTORŮ

LI-ION ACCUMULATORS CHARGER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MAREK VRBA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Juan Bautista Arroyo Garcia

BRNO 2012

Abstrakt:

V této práci je navržen a zrealizován prototyp nabíječky vysokokapacitních akumulátorů. Pro konstrukci nabíječky byl zvolen spínaný zdroj na bázi jednočinného blokujícího měniče se dvěma tranzistory. K řízení spínání tranzistorů byl vybrán integrovaný obvod IR2110 a jako ovládací část byl použit plošný spoj s mikrokontrolérem ATmega328 zvaný Arduino Uno. Při konstrukci bylo využito dalších částí z Arduino Uno Starter Kit jako jsou LCD display, relé a tlačítko. K napájení Arduino Uno a řídicího obvodu IR2110 je použit pomocný zdroj.

Dále nás práce seznamuje s procesy při nabíjení lithiových akumulátorů, popisem druhů lithiových akumulátorů a také metodou nabíjení akumulátoru typu LiFePO₄.

Abstract:

The main target of this thesis is to design and realize a prototype of a high capacity battery charger. The charger has been designed as a switching power supply based on a Flyback convertor with two transistors. As switching transistors the integrated circuit IR2110 has been selected. The convertor is controlled by a microcontroller board based on ATmega328 called Arduino Uno; some parts of the Arduino Uno Starter Kit are also used as LCD display, relay and button. In addition, an auxiliary source has been made; this one powers the integration circuit IR2110 and Arduino Uno board.

Furthermore, this work introduces us to the processes of charging lithium batteries, types of lithium batteries and methods of charging the lithium iron phosphate (LiFePO₄) battery.

Klíčová slova:

Spínaný zdroj , Blokující měnič, Arduino Uno

Keywords:

Switching power supply, Flyback convertor, Arduino Uno

VRBA, M. *Nabíječka lithiových akumulátorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 45 s. Vedoucí diplomové práce Juan Bautista Arroyo Garcia.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové 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 trestně právních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 30. 7. 2012

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce Juanu Bautistu Arroyo Garciovi za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v průběhu zpracovávání diplomové práce. Dále děkuji Univerzitě v Zaragoze, za poskytnutí prostoru k realizaci experimentálních prací a profesorovi Jesúsi Sergio Artal Sevilovi za poskytnutou metodickou pomoc a odborné rady.

Obsah

1.	Akumulátory na bázi lithia.....	8
1.1.	Nabíjecí a vybíjí proces.....	8
1.2.	Druhy.....	9
1.3.	Metoda nabíjení.....	11
1.4.	Nabíjený LiFeYPO_4 akumulátor	12
2.	Lineární vs. spínané zdroje	13
3.	Spínané zdroje	15
3.1.	Propustné zapojení	15
3.2.	Akumulující(blokující) zapojení	15
4.	Řízení měniče	19
4.1.	Arduino Uno.....	19
4.2.	PWM	19
5.	Návrh měniče	21
5.1.	Požadavky	21
5.2.	Řídicí obvod.....	21
5.3.	Primární část měniče	22
5.4.	Transformátor	24
5.5.	Sekundární část měniče	30
6.	Návrh měřících a ochranných obvodů	33
6.1.	Měření napětí	33
6.2.	Měření proudu	34
6.3.	Ochranné obvody.....	34
7.	Návrh řídicí části	36
7.1.	Popis programu	36
7.2.	Zapojení obvodu	37
8.	Pomocný zdroj	38
9.	Plošné spoje	38

10.	Ověření funkce.....	38
11.	Závěr.....	40
12.	Použitá literatura.....	41
13.	Seznam obrázků, tabulek, zkratek a příloh.....	43
13.1.	Seznam obrázků.....	43
13.2.	Seznam tabulek.....	44
13.3.	Seznam zkratek	44
13.4.	Seznam příloh	45

Úvod

Elektrická energie hraje významnou roli v každodenním životě. Můžeme ji snadno převést na světlo, teplo nebo na mechanickou energii. Avšak jedním z problémů elektrické energie její špatné „skladování“. Pro uchování elektrické energie se používají kondenzátory a akumulátory. Kondenzátory můžeme nabíjet přímo, ale elektrická energie, kterou v nich můžeme uchovat v porovnání s akumulátory je hodně nízká. K uchování elektrické energie v akumulátorech potřebujeme převést elektrickou energii na jinou formu. Prostředkem pro uchování elektrické energie v akumulátorech se používá elektrochemických reakcí, které jsou reverzibilní. To znamená, že vybitý akumulátor lze znovu nabít. Avšak tento cyklus nemůžeme opakovat do nekonečna, jelikož akumulátory mají omezený počet nabíjecích cyklů. Tento počet cyklů patří k nejdůležitějším parametrům akumulátorů.

Abychom zjistili vývoj akumulátorů musíme se vrátit do 18. století kdy v roce 1749 Benjamin Franklin poprvé použil termín "baterie", aby popsal sadu kondenzátorů, kterou využil pro své pokusy s elektřinou. Průlom způsobil v roce 1859 vynález Gastona Planta - olověný akumulátor. Jednalo se o vůbec první akumulátor, který mohl být znovu nabit, připojením zdroje stejnosměrného napětí. Olověný článek byl vůbec první "sekundární" článek (tzv. akumulátor). Dále postupně vznikaly další akumulátory jako například nikl-kadmium (Ni-Cd) s niklovou a kadmiovou elektrodou v draslíkové lázni, byl to první akumulátor s alkalickým elektrolytem (první alkalický akumulátor). Nikl-železo (Ni-Fe) byl objeven ve stejném roce a přestože měl horší vlastnosti než Ni-Cd, přece byl později patentován. Nikl-metal hydrid (NiMH) má větší životnost než Ni-Cd. Další typy akumulátorů jsou založeny na bázi lithia, zástupci jsou Li-ion(Lithium-ion) vysoká hustota energie vzhledem k objemu, Li-Pol(Lithium-polymerový) s dosud nejlepším poměrem váha/výdrž/životnost a Lithium Železo Fosfátový (LiFePO₄) technologie se vyznačuje nižšími výrobními náklady a nulovou toxicitou.

Akumulátory po vybití musíme nabíjet, právě k tomuto účelu slouží nabíječky akumulátorů. Na trhu je jich spousta, existují jak nabíječky pro určitý typ akumulátorů, tak nabíječky univerzální. Tato práce se zabývá mikrokontrolérem řízenou nabíječkou jednoho druhu akumulátoru. Konkrétně pro typ LiFeYPO₄.

1. Akumulátory na bázi lithia

1.1. Nabíjecí a vybíjecí proces

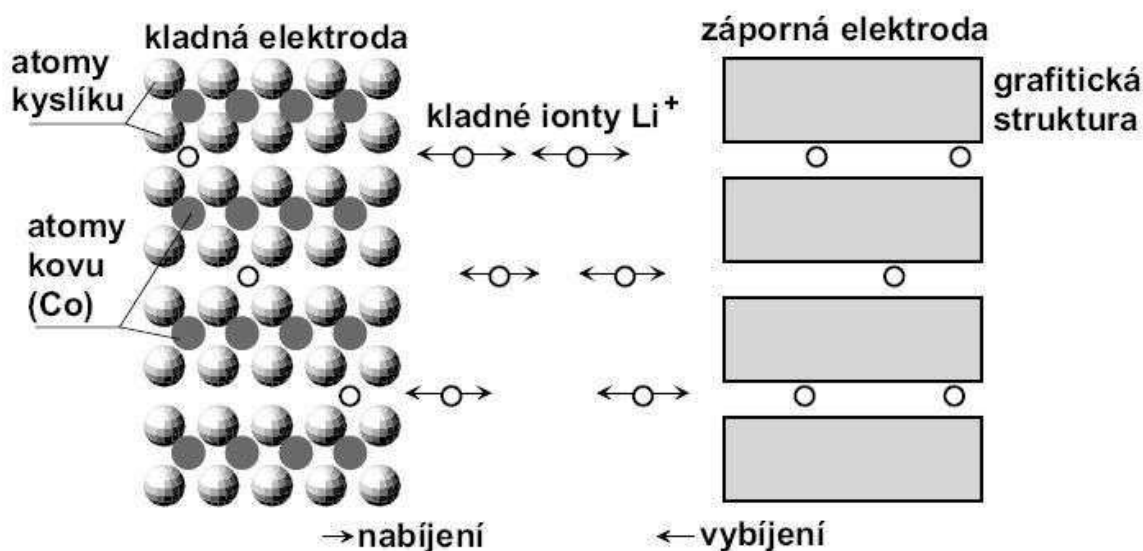
Struktura článku:

- ANODA (oxidy například LiCoO_2)
- KATODA (porézní uhlíková struktura)
- Elektrolyt – organické rozpouštědlo s několika monomery

Základní zjednodušená chemická reakce lithium-iontové baterie:



Anoda je vyrobena z uhlíku, katoda je oxid kovu a elektrolyt je lithiová sůl v organickém rozpouštědle.

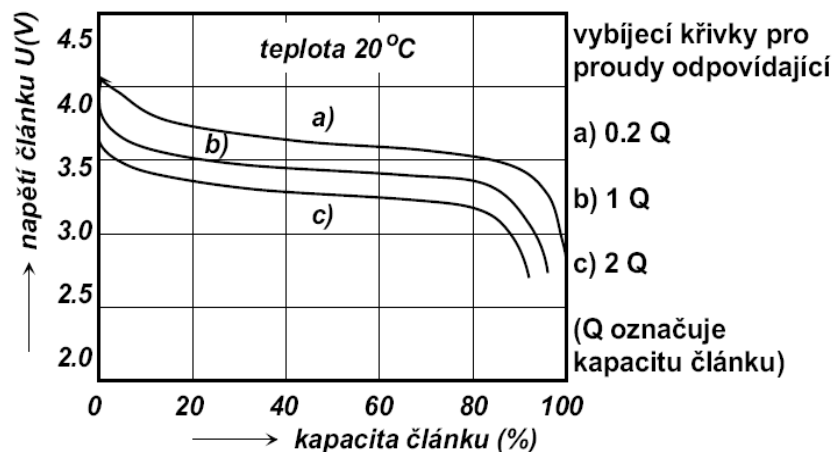


Obr. 1 Nabíjecí a vybíjecí proces lithiového článku

Principem elektrodové reakce je transport iontů lithia:

Nabíjení – z kovového oxidu do uhlíkové struktury, kladný materiál oxiduje a záporný materiál redukuje. V tomto procesu jsou ionty odebírány z kladného materiálu a jsou včleňovány do materiálu záporného.

Vybíjení – z uhlíkové porézní struktury do kovového bloku. Probíhá obrácený jev než při nabíjení. [7]



Obr. 2 Vybíjecí křivky lithiového sekundárního článku [7]

1.2. Druhy

Li-ion

Lithium-iontový (zkráceně Li-ion) akumulátor. Tato technologie byla vyvinuta z primárních lithiových článků. Protože tyto akumulátory disponují jmenovitým napětím 3,6V, mají výhodu oproti klasickým NiCd a NiMH akumulátorům, které disponují napětím pouze 1,2V, přičemž při stejné velikosti je poměr akumulované energie Li-on v porovnání s váhou velmi příznivý.

Použití:

- v mobilních telekomunikacích (telefony)
- přenosných počítačích

Výhody:

- rozsah provozních teplot
- rozsah použitelných proudových zátěží, obdobný jako u NiMH akumulátorů.

Nevýhody:

- nesmí být překročeno konečné napětí při nabíjení (může dojít k explozi)
- nesmí být překročeno vybití pod těsně stanovenou mez (zničení článku)

Při skladování je nutné tyto články minimálně jedenkrát ročně nabít, aby vlastním samovybitím nedošlo k vybití pod stanovenou mez.

Li-pol

Lithium-polymerové (Li-Pol) tato technologie byla vyvinuta z Lithium-iontových článků a tudíž jmenovité napětí jednoho článku je také 3,6V.

Použití:

- mobilních telefonech,
- kamerách, fotoaparátech,
- noteboocích

Výhody:

- prizmatický tvar (hranol),
- malá hmotnost
- vysoká kapacita
- velká výkonnost
- velmi malé samovybíjení

Nevýhody:

- nabíjení a vybíjení nesmí být překročeny výrobcem stanovené hodnoty=>nevratné poškození
- křehkost a „zranitelnost“=>poškození obalu článku=>požár nebo poškození zdraví
- používat pouze nabíječe, které jsou pro tyto články určené

[2], [3]

LiFePO₄

Klonem lithium-iontových nabíjecí akumulátorů jsou lithium železo fosfátové LiFePO₄ akumulátory zkratkou označovány jako LFP. Toto označení získaly díky katodě vyrobené z tohoto materiálu. Anoda je jako u ostatních Li-ion baterií vyrobena z uhlíku. Nominální napětí LiFePO₄ článků je zhruba 3,2 V (mezi 3,0 až 3,3 V), maximální nabíjecí napětí 3,6V. Minimální napětí na které je možné článek vybit se pohybuje obvykle kolem 2,8V. Některé akumulátory jsou schopny dodat pracovní proud i 40 A, životnost vyšší než 500 cyklů a lze je použít v rozmezí teplot -20°C až 70°C.

Bezpečnost LiFePO₄ akumulátorů vyplývá z vlastností tohoto materiálu. Katoda je u klasických li-ion článků tvořena z LiCoO₂. Vazba Fe-P-O je daleko silnější než Co-O, takže při špatném použití (zkratování článku, vystavení vysoké teplotě) je daleko těžší uvolnit atomy kyslíku. Pouze za výjimečných teplotních podmínek, obecně přes 800°C, se tato vazba poruší a nastane extrémní tepelný únik (exploze), ke kterému jsou právě klasické li-ion akumulátory tolik náchylné za daleko nižších teplot.

Použití:

- průmyslové použití
- elektrická, trakční vozidla

Výhody:

- schopnost dodat vyšší proud
- při extrémních podmínkách nevybuchují
- nízké výrobní náklady
- zcela netoxické (na rozdíl od klasických Li-ion)
- výjimečná teplotní stabilita
- velmi dobrý elektrochemický výkon
- vysokou kapacitu až 170 mAh/g
- Samovybíjecí efekt prakticky neexistuje

Nevýhody:

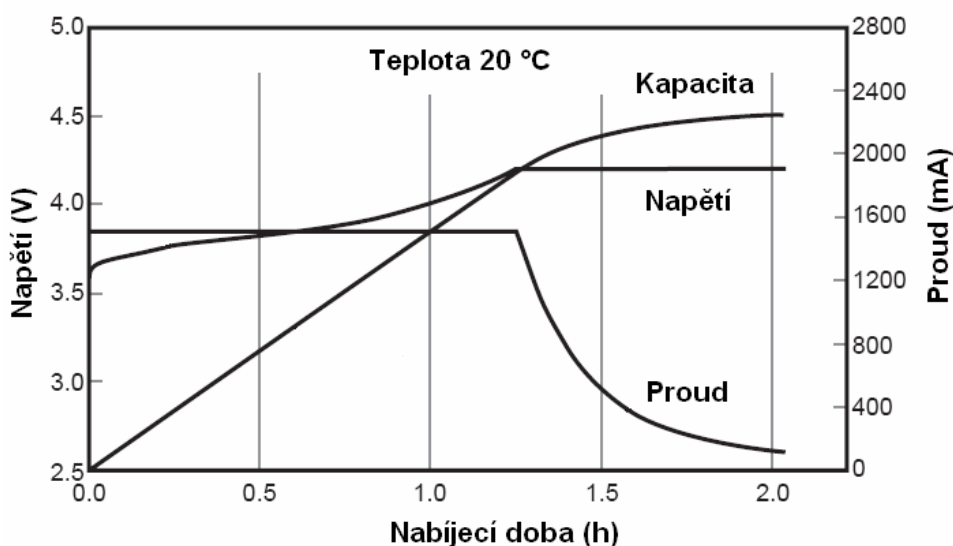
- nižší napětí
- nižší hustota energie (při stejném objemu mají nižší kapacitu)

LiFeYPO₄

Bezpečné lithiové akumulátory na bázi LiFePO₄ s příměsí yttria zkratkou označovány jako LYP. Tyto akumulátory jsou téměř totožné s LiFePO₄ až na rozdíl, že v akumulátorech LiFeYPO₄ je přidána příměs Yttria do katody LiFePO₄ článku pro zrychlení pohybu iontů v nízkých teplotách. Tato výhoda se nejvíce projeví, když se akumulátory používají v automobilech, které jsou vystaveny v zimním období nízkým teplotám. Tyto akumulátory mohou být používány v rozmezí teplot -45°C až +85°C na rozdíl od LiFePO₄ bez příměsí Yttria, které mají rozmezí teplot -20°C až 70°C. [5], [6]

1.3. Metoda nabíjení

Nabíjení článků LiFeYPO₄ je téměř stejné jako nabíjení článků Li-ion, jelikož Li-ion je předchůdce tohoto článku.



Obr. 3 Nabíjecí charakteristiky článku Li-ion [8]

Nabíjení se provádí nejprve v režimu konstantního proudu o velikostech 0,2-0,7 C. Po dosažení napětí 4,2 V na Li-ion článcích a 3,4 V na LiFeYPO₄ článcích přejde nabíjení do režimu konstantního napětí, kde je toto napětí udržováno a proud je postupně snižován. Nabíjení je ukončeno ve chvíli, kdy nabíjecí proud klesne na 10% hodnoty proudu v konstantním režimu. Akumulátory Li-ion jsou velmi náchylné na přebíjení a proto se zde kapkové dobíjení již nepoužívá a z důvodu celkové náchylnosti ke zničení, se vybavují vlastním ochranným obvodem, který hlídá zejména maximální nabíjecí napětí, které nesmí překročit 4,3V na články u Li-ion a 3,6V u LiFeYPO₄. Při vybíjení zase nesmí napětí článku poklesnout pod 2,3 V a 2V u LiFeYPO₄ ochrana funguje i proti případnému zkratu. Uvedené hodnoty napětí pro LiFeYPO₄ jsou doporučené hodnoty od výrobce typu akumulátoru, který bude nabíjen zhotovenou nabíječkou.

1.4. Nabíjený LiFeYPO_4 akumulátor

K akumulátorům, které slouží v laboratořích elektrotechniky jako zdroj pro různé zkoušky a měření (například kalibrace přístrojů), není k dispozici žádná nabíječka, tudíž se můj projekt zabývá právě nabíječkou pro tyto akumulátory.

Výrobce	Typ	Ref.	U [V]	C [Ah]	R_i [m Ω]	$I_{\max}$ [A]/[s]	$U_{\min}$ [V]
Sky Energy	LiFeYPO_4	SE180AHA	3,3	180	3,0	720/30	2
Rozsah[°C]	Nab. $I_{\max}$ [A]	Počet cyklů	Max. energie[W/h]	Energie [Wh/kg]	Energie [Wh/l]	Rozměry [vxšxh]	Váha [kg]
-25 až 55	480	2000	594	106	162,4	182x71x283	5,6

Tab. 1 Hodnoty nabíjeného akumulátoru LiFeYPO_4

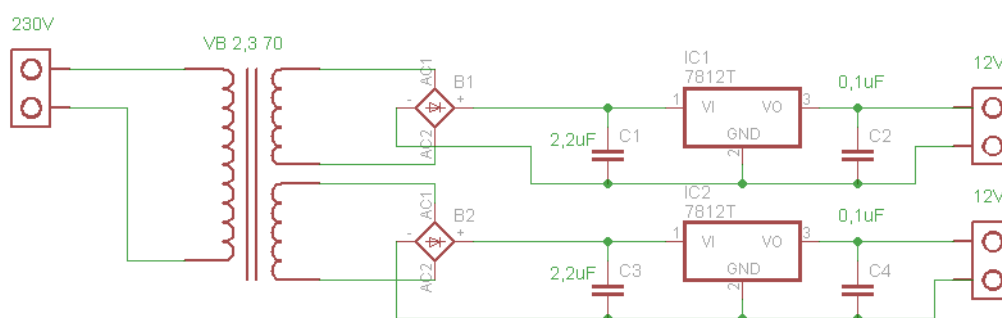


Obr. 7 Nabíjený akumulátor LiFeYPO_4

2. Lineární vs. spínané zdroje

Lineární zdroje

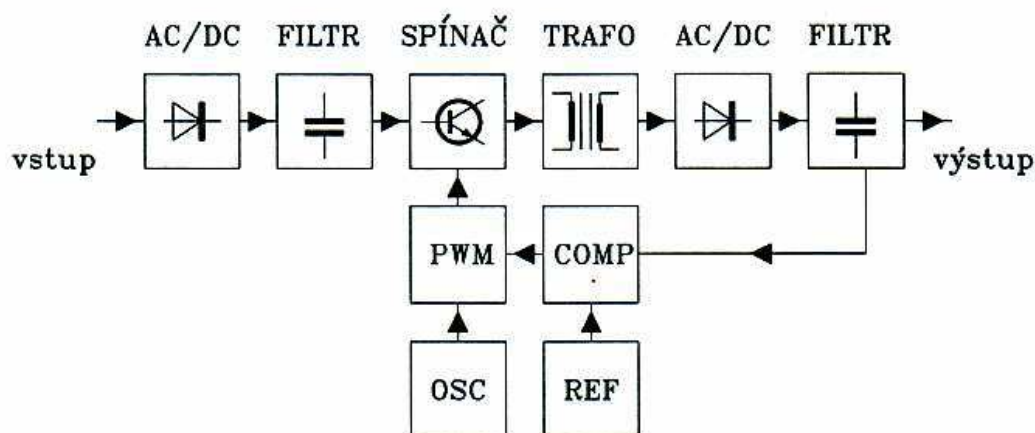
Abychom dosáhli elektrické izolace vstupního a výstupního napětí musíme použít transformátor s frekvencí 50Hz, kterým snížíme vstupní střídavé napětí na požadované, které se musí usměrnit. K tomuto účelu se používají usměrňovací diody v zapojení jako jednocestný usměrňovač, dvojcestný usměrňovač nebo můstkový usměrňovač. Takto usměrněné napětí je nutno vyfiltrovat filtračním kondenzátorem a dále zařadit stabilizátor, který může být parametrický, lineární nebo diskretně lineární. Nevýhodou lineárních zdrojů je jejich nízká účinnost (ztrátový výkon se mění v teplo a je potřeba chlazení). Dále také není vhodné kvůli ztrátám použít lineární zdroj při velkých rozdílech vstupního a výstupního napětí a také při velkých odběrech proudu. Výhodou je jejich nízká cena a absence vysokofrekvenčního rušení jako například u zdrojů spínaných.



Obr. 4 Příklad lineárního zdroje se dvěma výstupy 12V

Spínané zdroje

Spínaný zdroj se skládá zpravidla z částí znázorněných na obr. 5. Výhodou spínaných zdrojů je jejich vysoká účinnost a od určitého výkonu výrazně menší rozměry a váha.



Obr. 5 Blokové schéma spínaného zdroje [9]

Síťové napětí se usměrňuje usměrňovačem, vyhlazuje filtračním kondenzátorem a přivádí na vstup měniče. Usměrněné a vyhlazené vstupní napětí se přivede na spínací prvek realizovaný bipolárním nebo výhodněji, kvůli menším ztrátám, MOSFET tranzistorem, který

ho převede na střídavé napětí obdélníkového průběhu. Napětí přerušované tranzistorem se přivádí přes primární vinutí transformátoru, jenž zajišťuje potřebný napěťový převod a galvanické oddělení sekundární části od sítě. Získané sekundární napětí se opět usměrňuje usměrňovačem z velmi rychlých diod a filtruje výstupním filtrem. Všechny spínané zdroje jsou řízeny zpětnou vazbou. Z napájecího napětí pro řídicí blok se odvozuje referenční napětí-REF a v zesilovači odchylky komparátoru - COMP porovnáno s chybovým napětím, úměrným výstupnímu napětí. Získaný analogový spojitý chybový signál ze zesilovače se pak porovnává v komparátoru s pilovitým napětím z oscilátoru-OSC. Čímž se vytváří šířkově modulovaný signál PWM. Šířka budících impulsů na výstupu komparátoru je přímo úměrná velikosti a nepřímo úměrná smyslu odchylky. Budícími impulsy je pak ovládán výkonový spínač. [9]

Výběr zdroje

Lineární

- cena lineárně roste s výkonem
- má menší zvlnění
- má menší účinnost (30-60%)
- síťový transformátor pracuje při frekvenci rozvodné sítě(50Hz nebo 60Hz)
- nevytváří vysokofrekvenční rušení

Spínané

- transformátor pracuje na vyšší frekvenci=>menší hmotnost a rozměry transformátoru
- může být zdrojem rušivých signálů
- cena se málo mění s výkonem
- má výrazně větší účinnost(70-90%)

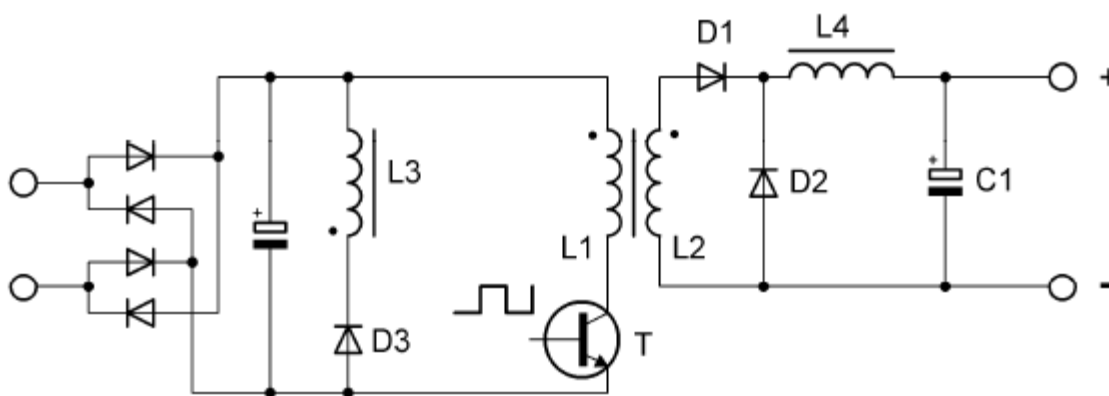
Pro konstrukci nabíječky byl zvolen zdroj spínaný a to z důvodů vyšší účinnosti, zmenšení rozměrů a hmotnosti. Například transformátor pro zdroj o výkonu 200W může mít hmotnost až 10kg. Tato skutečnost značně zvětšuje rozměry a váhu. Jedinou výhodou lineárního zdroje s tak velkým transformátorem, je že nemá vysokofrekvenční rušení, na rozdíl od zdrojů spínaných.

3. Spínané zdroje

Spínané zdroje lze rozdělit podle jejich zapojení a funkce do několika základních skupin. Jednotlivá zapojení se obvykle rozlišují podle způsobu přenosu energie z primárních obvodů do obvodů sekundárních. Níže budeme diskutovat pouze dva zástupce zapojení spínaných zdrojů, které jsou vhodné pro náš účel.

3.1. Propustné zapojení

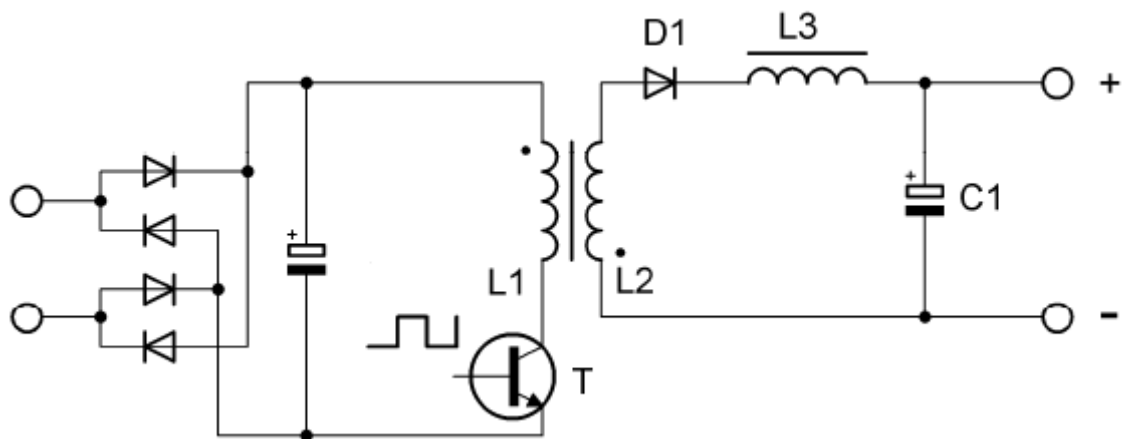
Propustný měnič s transformátorem (v anglické literatuře označovaný jako FORWARD) je vhodný pro přenos velkých výkonů díky principu činnosti, spočívajícím v tom, že proud přenášející výkon se nepodílí na magnetizaci jádra transformátoru, protože protéká obvodem pouze v době sepnutí spínače a to jak v sekundárním, tak i v primárním vinutí. To má za následek kompenzaci magnetických účinků.



Obr. 6 Propustné zapojení s demagnetizačním vinutím [9]

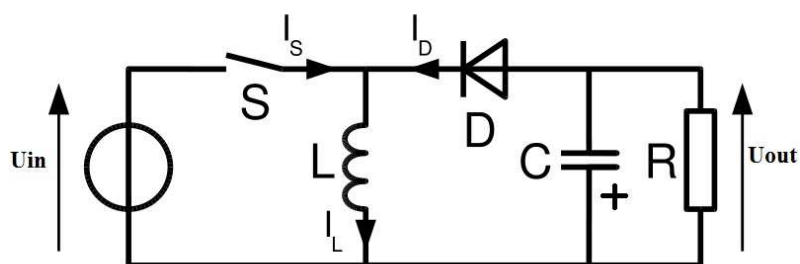
3.2. Akumulující(blokující) zapojení

Nebo-li akumulující(blokující) měnič s transformátorem (v anglické literatuře označovaný jako FLYBACK) je vhodný pro přenos výkonů do 100W, ale při zapojení s dvěma tranzistory nebo speciálními integrovanými obvody jako je TOPSwitch lze dosáhnout výkonu až 250W. Princip činnosti tohoto zapojení se liší od propustného zapojení tím, že veškerá energie je akumulována do magnetického pole primární cívky transformátoru a až po rozepnutí tranzistoru je akumulovaná energie odebírána sekundární cívkou transformátoru. Problémem toho zapojení je, že se nespoteřebuje všechna energie akumulovaná v transformátoru a tento zbytek energie se vrátí na primární stranu a zvětší nám pracovní napětí, tento důvod značně omezuje použití tohoto zapojení při vyšších výkonech, kde jej nahrazuje propustné zapojení.



Obr. 7 Akumulující blokující zapojení [9]

Na obr. 7 vidíme typické zapojení akumulujícího měniče s jedním spínacím prvkem, transformátorem, výstupní diodou a LC filtrem. Akumulující měnič je odvozen ze zapojení, které obsahuje funkci snižování napětí (Step-Down nebo BUCK) a zvyšování napětí (Step-Up nebo BOOST). Toto zapojení se nazývá invertující měnič se společnou tlumivkou (BUCK-BOOST).



Obr. 8 Invertující měnič se společnou tlumivkou (BUCK-BOOST)

Princip činnosti:

Při sepnutém spínači S (v době t_1) roste proud ze zdroje U_{in} do indukčnosti L po celou dobu sepnutí S. Po rozepnutí spínače S má indukčnost snahu pokračovat ve směru a velikosti proudu I_S proudem I_D , který se bude uzavírat přes nabíjený kondenzátor C a diodu D. Tím na kondenzátoru C poroste napětí, ale v polaritě plus dole, minus nahoře. Výstupní napětí U_{out} má tedy opačnou polaritu vzhledem ke společné svorce, než napětí vstupní U_{in} . Dioda D je polarizována tak, aby nedocházelo během doby t_1 k přebíjení kondenzátoru C na kladnou polaritu ze zdroje U_{in} . Doby spínání spínače S nejsou interpretovány jednoznačně. Při růstu doby t_1 (sepnutí S) sice roste velikost akumulované energie v magnetickém poli indukčnosti, ale o to více klesá výstupní napětí vybíjením kondenzátoru C do zátěže. Z principu činnosti vyplývá, že výstupní napětí U_{out} může být jak menší, tak i větší, než napětí vstupní U_{in} . Matematicky lze obvod popsat pro t_1 :

$$\frac{-U_{in} \cdot t_1}{L} = dI_S \quad (2)$$

a pro dobu t_2 :

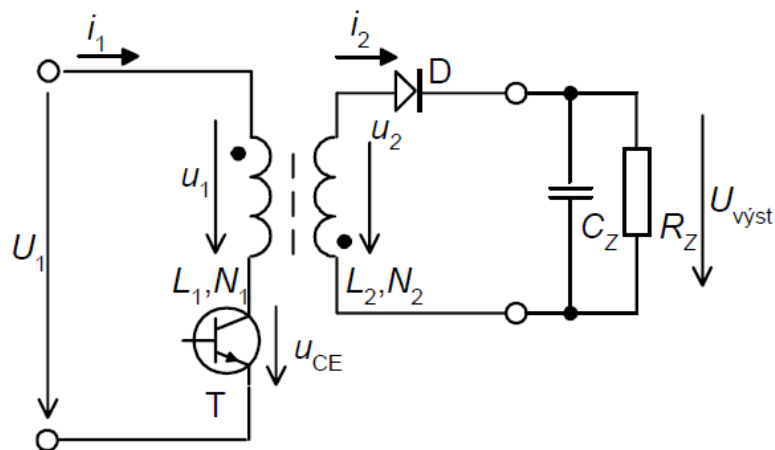
$$\frac{-U_{out} \cdot t_2}{L} = -dI_D \quad (3)$$

a spojením obou rovnic dostaneme:

$$U_{OUT} = \frac{-U_{IN} \cdot s}{1-s} = \frac{-U_{IN}}{\frac{1}{s}-1} \quad (4)$$

Z výsledného vztahu číslo 4 je vidět, že bude-li $s=0,5$, pak výraz $1/s$ nabývá hodnoty 2, jmenovatel má hodnotu 1 a bude platit $U_{out}=-U_{in}$. Bude-li $s<0,5$, pak $(1/s)>2$ a jmenovatel má hodnotu větší než jedna a platí $U_{out}<U_{in}$. Naopak, jestliže je hodnota s v rozmezí $0,5<s<1$, pak výraz $1/s$ nabývá hodnot mezi 1 a 2, jmenovatel ve vztahu hodnot mezi 0 a 1 a tehdy platí $U_{out}>U_{in}$.

Následuje podrobný popis blokující zapojení. Základem tohoto měniče jak už bylo řečeno je invertující měnič se společnou tlumivkou jak si můžeme všimnout na obr. 9. Z původního schématu obr. 8 zmizela tlumivka, jejíž funkci nyní zastane transformátor. Princip činnosti je podobný. Musíme si uvědomit, že jádro transformátoru je magnetováno stejně jako jádro tlumivky pouze s tím rozdílem, že stejných magnetických poměrů se dosáhne pomocí dvou vinutí namísto jednoho a současně získáme galvanické oddělení. Vznikl tak transformátor s režimem značně se lišícím od činnosti propustného měniče, s velmi podobnými magnetickými účinky v jádře.

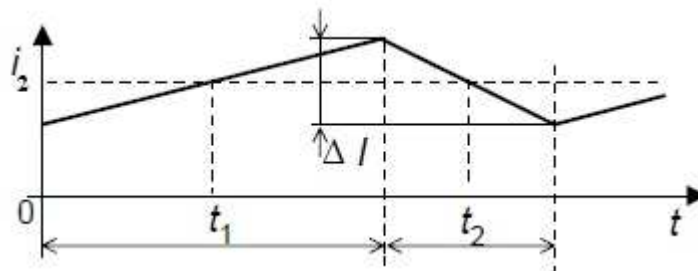


Obr. 9 Jednočinný blokující měnič [19]

Blokující měnič může pracovat ve dvou režimech, v režimu spojitých proudů nebo v režimu přerušovaných proudů. Pro správnou funkci nabíječky potřebujeme, aby zapojení pracovalo v režimu spojitých proudů, což znamená, že chceme odebírat z výstupu konstantní proud.

Režim spojitých proudů:

Jde o stav, kdy magnetický tok neklesne v průběhu doby t_2 na nulu, nebo v mezním případě až na jejím konci viz obr. 10.



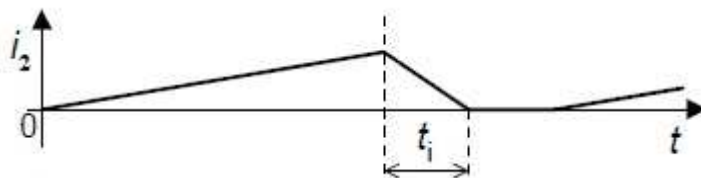
Obr. 10 Průběh proudu i_2 režim spojitých proudů

Popis činnosti:

Když se tranzistor T je vypne, v jádře transformátoru je akumulován magnetický tok. Primárním vinutím nemůže téci proud, teče proto sekundárním vinutím (stále musí některým vinutím téci magnetizační proud, jenž je svázán s existujícím magnetizačním tokem). To znamená, že při vypnutí tranzistoru se na L_2 vytvoří takové napětí, aby mohl proud i_2 téci. Napětí u_2 (i u_1) mají proto opačnou polaritu než v době t_1 . Pak proud i_2 lineárně klesá (u_2 je konstantní). Sepneme-li tranzistor T, na primárním vinutí bude napětí $u_1 = U_1$. Napětí u_2 bude mít opačnou polaritu než mělo v době t_2 a dioda je polarizovaná v závěrném směru. Proto proud i_2 skokem zaniká. Magnetický tok, ale nemůže zaniknout skokem, proto okamžitě vzniká primární proud o velikosti $I_0 N_2 / N_1$, kde I_0 odpovídá hodnotě i_2 těsně před zapnutím tranzistoru. Primární proud i_1 je odebírán ze zdroje U_1 a lineárně narůstá z počáteční hodnoty $I_0 N_2 / N_1$. Stejně tak roste i magnetický tok, svázaný nyní s proudem i_1 .

Režim přerušovaných proudů:

Jde o stav, kdy magnetický tok klesne v průběhu doby t_2 na nulu viz. obr. 11



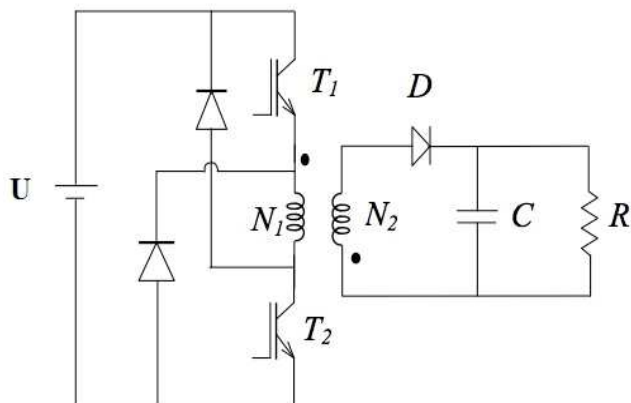
Obr. 11 Průběh proudu i_2 režim nespojitých proudů

Popis činnosti:

Střední hodnota proudu na sekundární straně transformátoru i_2 je tak malá, že klesající proud i_2 klesne na nulu dříve než skončí doba t_2 . V tomto okamžiku se zavírá dioda D a sekundární strana transformátoru tak zůstává plně izolována, neteče jí žádný proud a je na ni nulové napětí. Tento stav trvá až do dalšího sepnutí tranzistoru. Je zřejmé, že střední hodnota napětí u_2 je na sekundární straně měniče nulová (jako je tomu v režimu spojitých proudů).

Další topologie blokujícího měniče

Modifikací topologie blokujícího měniče můžeme získat další zapojení jako je například paralelně zapojené blokující měniče nebo měniče s dvěma tranzistory. Právě zapojení s dvěma tranzistory viz. obr. 12 se používá pro zmenšení stresu v zapojení s jedním tranzistorem, tím pádem při použití druhého tranzistoru není nutné do zapojení zařazovat odlehčovací obvody. Jelikož vstupní stejnosměrné napětí se rozdělí mezi dva tranzistory rovným dílem. [18], [19], [20]



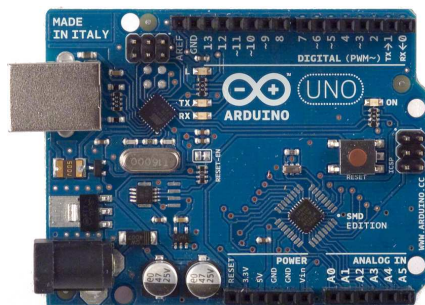
Obr. 12 Blokující měnič s dvěma tranzistory

4. Řízení měniče

V řídicí části bude použit plošný spoj Arduino Uno s mikrokontrolérem ATmega328 a jeho příslušenství jako LCD display a relé z Arduino Starter Kit.

4.1. Arduino Uno

Jedná se o otevřenou elektronickou platformu, založenou na uživatelsky jednoduchém hardware a software. Fyzicky tuto platformu tvoří plošný spoj s mikrokontrolérem na bázi ATmega328. Obsahuje 14 digitálních vstupů a výstupů (6 z nich použitelných jako PWM výstupy), 6 analogových vstupů a 16 MHz krystalový oscilátor, propojení pomocí USB a také resetovací tlačítko. Mikrokontrolér na desce Arduino se programuje pomocí speciálního Arduino programovacího jazyku (založeném na jazyku Wiring – podobnému jazyku C) ve vlastním Arduino vývojovém prostředí.



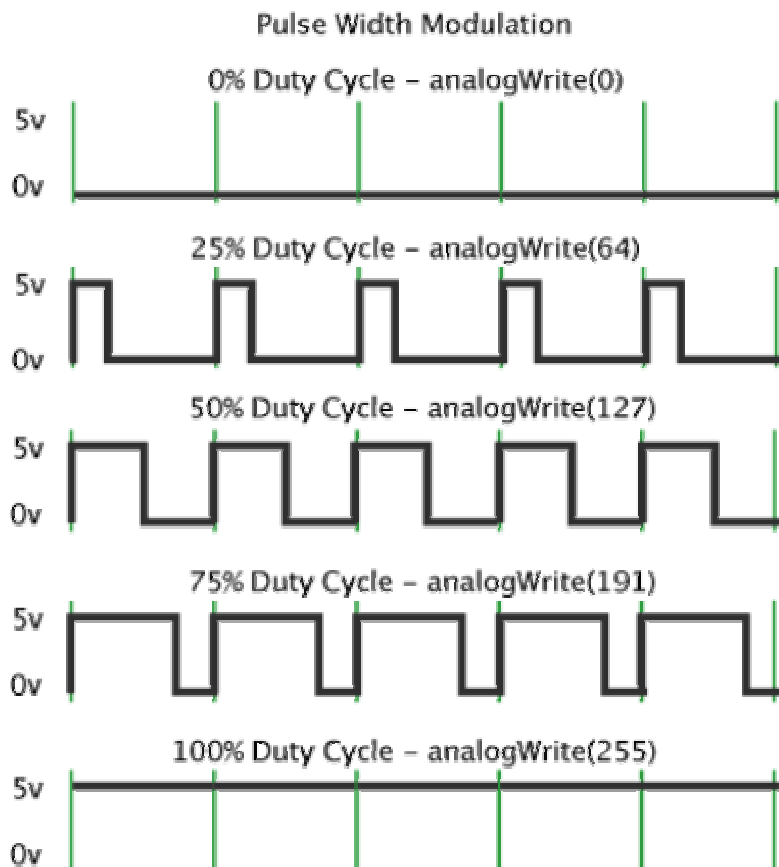
Obr. 13 Arduino Uno SMD [1]

4.2. PWM

Pulzně šířková modulace (anglicky pulse width modulation) je technika jak získat analogový signál s digitálním významem. Může nabývat hodnot zapnuto (logická 1) a vypnuto (logická 0). Hodnota přenášeného signálu je vyjádřena v poměru mezi stavy zapnuto a vypnuto. Tomuto poměru se říká střída (anglicky duty cycle). Cyklus kdy dojde k přenosu jedné střídy se říká perioda. Poměr mezi stavem zapnuto a vypnuto můžeme měnit.

Délka pulzu kdy je signál v log.1 (zapnuto) se nazývá šířka pulzu. Takže pro změnu (modulaci) signálu se mění právě šířka pulzu.

Na obr.14 je vidět ukázka PWM signálu, použitelného z plošného spoje Arduina. Zelené čáry znázorňují pravidelnou periodu signálu. Tato perioda je obrácená hodnota frekvence signálu PWM. Jinými slovy se signálem PWM generovaným Arduinem o frekvenci 500Hz, každá zelená čára bude reprezentovat periodu 2ms. Příkazem `analogWrite()` je perioda v rozsahu 0-255. Příkaz `analogWrite(255)` je střída 100% vždy zapnuto. Příkaz `analogWrite(127)` je střída 50% což reprezentuje polovinu periody.



Obr. 14 PWM signál získaný příkazem `analogWrite()` ve vývojovém prostředí Arduino

5. Návrh měniče

5.1. Požadavky

Zrealizovat malou, lehkou a levnou nabíječku, která šetrně nabije jednotlivé akumulátory. Parametry výstupu měniče jsou 11V/16A.

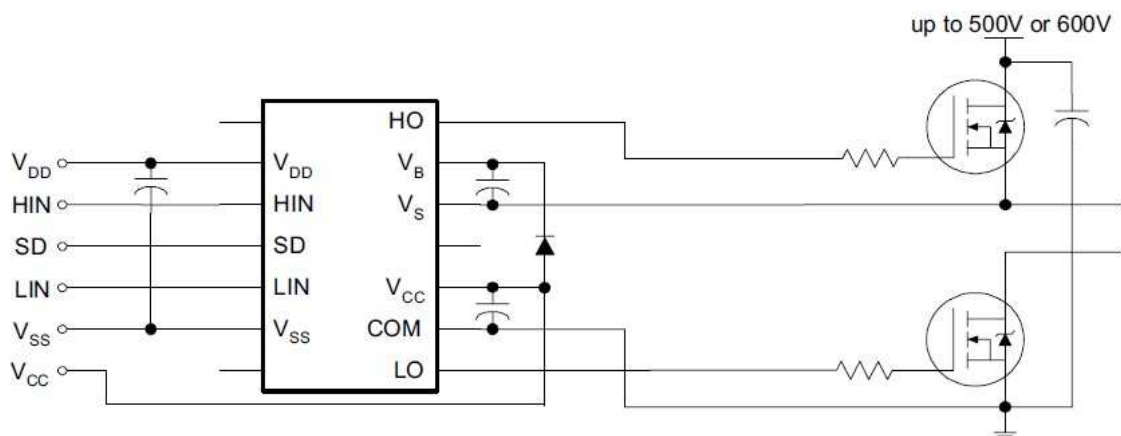
Napájecím zdroj, navržený na principu blokujícího měniče se dvěma tranzistory viz. obr. 12, řízenými integrovaným obvodem IR2110, který může řídit oba tranzistory a tyto tranzistory bude spínat současně. Dále je potřeba navrhnout pomocný zdroj s dvěma výstupy +8V a +12V. Napětí +8V pro Arduino a napětí +12V pro řídicí obvod IR2110. Celý systém je řízen mikrokontrolérem ATmega328 na platformě Arduino Uno.

5.2. Řídicí obvod

Pro řízení spínání tranzistorů je použit integrovaný obvod IR2110. Tento obvod je vysokorychlostní řídicí obvod pro tranzistory MOSFET s nezávislými dvěma výstupy, což umožňuje tranzistory spínat s časovou prodlevou nebo současně.

V_{OFFSET} [V]	I_{O} [A]	V_{OUT} [V]	$t_{\text{on/off}}$ [ns]	zpoždění [ns]
500 max	2	10-20	120/94	10

Tab. 2 Parametry integrovaného obvodu IR2110



Obr. 15 Typické zapojení integrovaného obvodu IR2110

Zapojení uvedené na obr. 15, bylo užito pro řízení tranzistorů v zapojení nabíječky. Před použitím tohoto zapojení je nutno vypočítat hodnoty kondenzátorů, diody, rezistorů a zajistit napájení vývodu V_{DD} napětím +3V až +20V pro logické obvody a vývodu V_{CC} napětím 10V až 20V pro dobíjení kondenzátoru mezi V_{CC} a COM.

Rezistory připojené na hradla tranzistorů jsou určeny ke zpoždění signálu, v našem případě byly zvoleny rezistory o hodnotě 100 Ω . Napájení bylo zvoleno 12V pro dobíjení kondenzátoru V_{CC} a COM a napětí +5V pro logické obvody zajišťuje pomocný zdroj. 5V získáváme pomocí lineárního stabilizátoru typu 7805 z napětí 12V.

Výpočet pomocných kondenzátorů mezi vývody VS,VB a VCC,COM:

$$C \geq \frac{2 \cdot \left[2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{cbs(leak)}}{f} \right]}{U_{cc} - U_f - U_{LS} - U_{min}} = \frac{2 \cdot \left[2 \cdot 32 \cdot 10^{-9} + \frac{250 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^3} + 5 \cdot 10^{-9} + \frac{100 \cdot 10^{-9}}{100 \cdot 10^3} \right]}{12 - 0,83 - 4 - 2} = 27nF \quad (5)$$

Kde Q_g je vstupní náboj na vývodu HO, f pracovní frekvence, $I_{Cbs(leak)}$ rozptylový proud pomocných kondenzátorů, $I_{qbs(max)}$ maximální V_{BS} klidový proud, U_{CC} napájení, U_f úbytek na pomocné diodě, U_{LS} úbytek na zátěži, U_{Min} minimální napětí mezi V_B and V_S , Q_{ls} požadovaný náboj za periodu (typicky 5nC pro 500V/600V)

Z tohoto vztahu plyne, že hodnota kondenzátorů musí být větší nebo rovna 27nF. Pro kondenzátor mezi vývody V_B a V_S bylo zvoleno 0,1uF (keramický) a pro kondenzátor mezi vývody V_{CC} a COM se volí kondenzátor minimálně s desetkrát větší kapacitou podle doporučení aplikačních listů, tímto se zrovnoměrní rozdělení napětí na oba spínací tranzistory. Hodnota kondenzátoru je 2uF(keramický). Dalším kondenzátorem v zapojení je mezi vývody U_{DD} a U_{SS} , což je klasický odlehčovací kondenzátor, který se volí 1uF(elektrolytický), také na doporučení aplikačních listů.

Dále je potřeba zvolit pomocnou diodu, odolávající maximálnímu stejnosměrnému napětí v obvodu, proudu do kondenzátoru a také musí mít rychlou rekuperační dobu $t_{tr} < 100ns$. Pro výpočet proudu se nejdříve musí vypočítat minimální náboj dodán do pomocného kondenzátoru Q_{BS} :

$$Q_{BS} = 2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{cbs(leak)}}{f} = 2 \cdot 32 \cdot 10^{-9} + \frac{250 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^3} + 5 \cdot 10^{-9} + \frac{100 \cdot 10^{-9}}{100 \cdot 10^3} = 72nC \quad (6)$$

Potom se proud vypočítá:

$$I_F = Q_{BS} \cdot f = 72 \cdot 10^{-9} \cdot 100 \cdot 10^3 = 7,2mA \quad (7)$$

[13], [14], [15]

Jako pomocná dioda je zvolena vysokorychlostní spínací dioda s označením UF5408.

$V_{RRM}[V]$	$I_F[A]$	$V_F[V]$	$t_{tr}[ns]$	$T_j[^\circ C]$
1000	3	1,7	75	-55 do 150

Tab. 3 Parametry vysokorychlostní diody s označením UF5408 [16]

5.3. Primární část měniče

Usměrňovač a kondenzátory

Usměrnění je zajištěno diodovým můstkem zvaným Graetzův můstek. Lze ho zhotovit ze čtyř samostatných diod zapojených do můstkového zapojení. Další možností je použít už hotový můstek jako jednu součástku. Z výkonu $P=176W$ a vstupního napětí můžeme určit velikost proudu usměrňovačem I_d .

$$I_d = \frac{P}{U_{vst}} = \frac{205}{325} = 0,63A \quad (8)$$

Při napětí 230V se diody dimenzují na napětí 400V, jistější variantou ovšem bude použít diody se závěrným napětím nejméně 600V s ohledem na toleranci síťového napětí a náhodné přepětí v síti. Podmínkám vyhověl hotový můstek KBP307G s parametry:

I[A]	U _R [V]	Pracovní teplota[°C]
3	1000	-55 do +150

Tab. 4 Parametry KBP307G [10]

Hodnotu kondenzátoru určíme podle empirického vztahu: $1W=1\mu F$, což pro nabíječku o výkonu $P=205W$ splňuje kondenzátor s kapacitou 205 μF . Do obvodu byly zapojeny dva kondenzátory paralelně kvůli kvalitnější filtraci napětí s kapacitou 220 μF pro napětí 400V.

Tranzistory a diody

Rozhodujícími parametry pro spínacích tranzistorů MOSFET je kromě maximálního závěrného napětí U_{DSS} také maximální dovolený proud I_D a vnitřní odpor R_{DS} . Při výběru tranzistorů je důležitá efektivní hodnota proudu primárního vinutí I_{ef} a hodnota rezistoru R_{DS} , která by měla být co nejmenší, aby nedocházelo k vysokým ztrátám průchodem proudu. Je zvolen tranzistor IRF840 v pouzdře TO-220AB byl použit z důvodu jednoduché dostupnosti. Pro zadané parametry je tento tranzistor nedostačující, jak můžete vidět v tab. 5 v posledním sloupci rozptylový výkon. Pro dosažení potřebných parametrů by byl podstatně vhodnější tranzistor IRFP460, který bohužel v době vývoje nabíječky nebylo možno nikde zakoupit. Pokud se podaří zajistit výše uvedený typ budou se muset přepočítat ty hodnoty ve výpočtech, kterých se tato změna dotkne, tak aby se dosáhlo požadovaných parametrů na výstupu(11V, 16A).

Výpočty proudů v tranzistoru:

$$I_{Tmax} = I_s = 1,53A \quad (9)$$

$$I_{Tef} = I_s \cdot \sqrt{s} = 1,53 \cdot \sqrt{0,41} = 0,98A \quad (10)$$

$$I_{Tstř} = I_s \cdot s = 1,53 \cdot 0,41 = 0,63A \quad (11)$$

Ztráty v tranzistoru v zapnutím stavu jsou způsobeny vnitřním odporem R_{DS} , kterým prochází proud. Tyto ztráty se vypočítají:

$$P_p = R_{DS(on)} \cdot (I_{Tef})^2 = 0,85 \cdot 0,98 = 0,81W \quad (12)$$

Tranzistor pracuje s vysokou frekvencí, což způsobuje spínací ztráty. Velikost spínacích ztrát určíme:

$$P_r = f \cdot W_{off} = \frac{1}{4} \cdot f \cdot t_{doff} \cdot U_{vst} \cdot I_{Tmax} = \frac{1}{4} \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 49 \cdot 10^{-9} \cdot 325 \cdot 1,53 = 0,61W \quad (13)$$

$$P_{Tcelkove} = P_p + P_r = 0,81 + 0,61 = 1,42W \quad (14)$$

U_{DSS} [V]	R_{DS} [Ω]	I_D [A]		P_D [W]
		$T_c=25^\circ\text{C}$	$T_c=100^\circ\text{C}$	$T_c=25^\circ\text{C}$
500	0,85	8	5,1	125

Tab. 5 Parametry vybraného tranzistoru IRF840 [23]

Demagnetizační diody

Pro závěrné napětí demagnetizačních diod platí $2U$, což je 2 krát 325V. Diody se dimenzují na maximální hodnotu proudu, který v nich protéká.

Výpočet maximálního proudu v primárním vinutí:

$$I_{\max} = \frac{I_{L\max}}{n} = \frac{18,4}{10,89} = 1,68A \quad (15)$$

Jako demagnetizační diody byly zvoleny vysokorychlostní spínací diody s označením UF5408. Parametry diod jsou v tab. 3 na straně 22.

5.4. Transformátor

Vstupní parametry pro návrh transformátoru jsou frekvence $f=100\text{kHz}$, výstupní napětí 11V a výstupní proud 16A. Účinnost je předpokládána $\eta = 85\%$ a střída $s_{\max} = 0,50$. Při účinnosti 85%(ztráty na výstupním usměrňovači a v transformátoru), bude transformátorem přenášený výkon 205W. Střídavé napětí je proměnné mezi 210 až 240V.

Výpočet primárního vnutí

Výpočet minimálního stejnosměrného vstupního napětí:

$$U_{\min} = \sqrt{2 \cdot U_{AC\min}^2 - \frac{2 \cdot P_0 \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot f_L} - t_c\right)}{\eta \cdot C_{IN}}} = \sqrt{2 \cdot 210^2 - \frac{2 \cdot 205 \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot 50} - 3 \cdot 10^{-3}\right)}{0,85 \cdot 400 \cdot 10^{-6}}} = 282V \quad (16)$$

t_cdoba po kterou vede dioda vstupního usměrňovače proud

C_{IN}hodnota vstupních filtračních kondenzátorů

Výpočet maximálního stejnosměrného vstupního napětí:

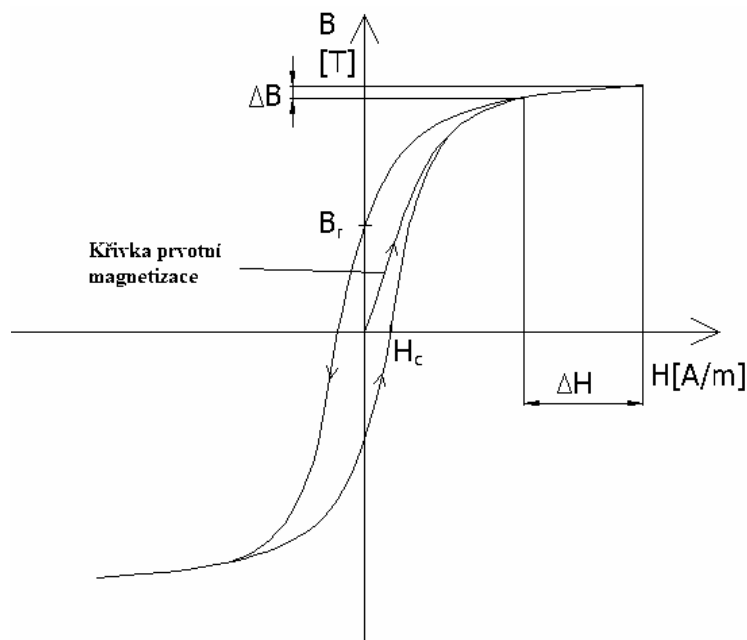
$$U_{\max} = U_{AC\max} \cdot \sqrt{2} = 240 \cdot \sqrt{2} = 340V \quad (17)$$

Výpočet minimální hodnoty střídy:

$$s_{\min} = \frac{s_{\max} \cdot U_{\min}}{U_{\max}} = \frac{0,5 \cdot 282}{340} = 0,41(-) \quad (18)$$

Výběr jádra transformátoru:

Jádro transformátoru by mělo být z magneticky měkkého materiálu a z co nejužší a nejvyšší hysterezní smyčkou. Také by mělo mít největší měrný odpor, který zabrání vzniku velkých ztrát vířivými proudy. Použití vysoké pracovní frekvence umožňuje malé rozměry transformátoru při velkém přenášeném výkonu. Tyto vlastnosti splňují feritové jádra, ovšem feritové jádra mají malou maximální hodnotu sycení, která u feritů bývá 0,2-0,4 T. Když dojde k překročení maximálního sycení $B_{\max}$ dochází při malé změně magnetické indukce B k velké změně intenzity magnetického pole H , což je vidět na obr. 16.

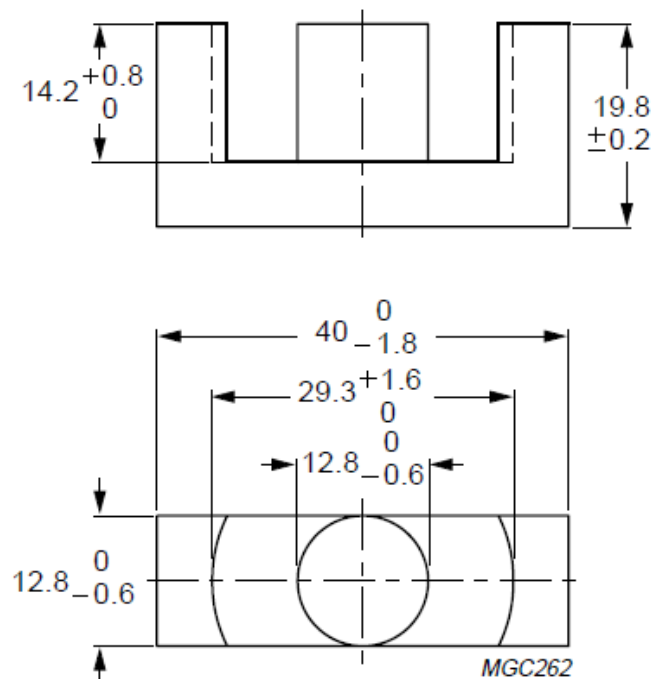


Obr. 16 Hysterezní smyčka magneticky měkkého materiálu

Bylo zvoleno jádro z feromagnetického materiálu, které je určeno pro aplikaci spínaných zdrojů s vysokými frekvencemi typu ETD39/20/13 z materiálu 3C90.

$\sum l/A$ [mm ⁻¹]	V_e [mm ³]	L_e [mm]	A_e [mm ²]	$A_{\min}$ [mm ²]	A_L [nH]	m [g]
0,737	11500	92,2	125	123	3000	30

Tab. 6 Parametry jádra transformátoru ETD39/20/13 z materiálu 3C90 [12]



Obr. 17 Jedna polovina transformátorového jádra rozměry v mm [12]

Počet závitů primárního vinutí:

$$N_p = \frac{U \cdot t}{B_{\max} \cdot Ae} = \frac{325 \cdot 4,1 \cdot 10^{-6}}{240 \cdot 10^{-3} \cdot 123 \cdot 10^{-6}} = 45,13z = 46z \quad (19)$$

U.....stejnosemné napětí přivedené na měnič

t.....doba sepnutí tranzistoru

B_{max}.....maximální hodnota sycení

A_e.....minimální obsah jádra v mm²

Výpočet průměrného proudu v primárním vinutí:

$$I_p = \frac{P}{\eta \cdot U_{\min}} = \frac{205}{0,85 \cdot 282} = 0,84A \quad (20)$$

P..požadovaný výkon

U..stejnosemné napětí přivedené na měnič

Výpočet efektivní hodnoty proudu v primárním vinutí:

$$I_{ef} = \frac{I_p \cdot T}{s_{\min}} = \frac{0,84 \cdot 10}{4,1} = 2,04A \quad (21)$$

I_p..průměrný vstupní proud pro celou periodu

T...perioda

Výpočet špičkového proudu:

$$I_{\xi} = \frac{I_p}{\left(1 - \frac{K_{RP}}{2}\right) \cdot s_{\min}} = \frac{0,84}{\left(1 - \frac{0,6}{2}\right) \cdot 0,41} = 2,92 A \quad (22)$$

Pro optimalizaci mezi špičkovým proudem I_{ξ} a proudem I_R , který nám udává rozdíl mezi právě špičkovým proudem I_{ξ} a proudem I_{ef} se zavádí proměnná K_{RP} , která musí být menší než jedna pro spojitě proudy viz. rovnice číslo 23 a rovna jedné pro přerušované proudy viz.kapitola 3.2 spojitě a přerušované proudy. Pro vstupní střídavé napětí 230V se volí $K_{RP}=0,6$.

$$K_{RP} = \frac{I_R}{I_{\xi}} < 1 \quad (23)$$

$$L_p = \frac{U \cdot t}{I_{\xi}} = \frac{325 \cdot 4,1 \cdot 10^{-6}}{2,92} = 456 \mu H \quad (24)$$

L_p ..indukce primárního vinutí

Výpočet délky vzduchové mezery mezi jádry:

$$\alpha = \frac{\mu_r \cdot N_p^2 \cdot A_e}{L_p} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 46^2 \cdot 125}{870 \cdot 10^{-3}} = 0,38 mm \quad (25)$$

αdélka vzduchové mezery v mm

N_p ..počet závitů primárního vinutí

A_e ..obsah volného prostoru jádra

L_p ..primární indukce v mH

Použití vzduchové mezery sníží remanentní indukci a zvětší pracovní rozsah sycení jádra.

Ověření maximálního sycení jádra transformátoru:

$$B_{\max} = \frac{U \cdot t}{N_p \cdot A_e} = \frac{325 \cdot 4,1}{46 \cdot 125} = 0,23 T \quad (26)$$

Výpočtem se zjistilo, že nedochází k přesycení jádra transformátoru. Hodnota maximálního sycení jádra se nachází v daném maximálním rozsahu 0,2-0,4T.

Výpočet efektivní šířky vinutí:

$$BW_E = L \cdot [BW - 2M] = 1 \cdot [25,7 - 2 \cdot 3] = 19,7 mm \quad (27)$$

Lpočet vrstev vinutí

BW ..fyzická šířka držáku

Mšířka bezpečnostního okraje

Výpočet maximálního průměru vodiče primárního vinutí:

$$OD = \frac{BW_E}{N_p} = \frac{19,7}{46} = 0,428mm \Rightarrow 0,5mm \quad (28)$$

Proudová hustota:

$$CMA = \frac{1,27 \cdot OD^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{1000}{25,4}\right)^2}{I_p} = 253Cmils / A = 1,63 \cdot 10^{-7} A / m^{-2} \quad (29)$$

Výpočet sekundárního vinutí

Převod transformátoru:

$$p = \frac{N_s}{N_p} = \frac{U_{vyst}}{U_{vst} \cdot s} = \frac{11}{325 \cdot 0,41} = 0,083 \quad (30)$$

Počet závitů sekundárního vinutí:

$$N_s = p \cdot N_p = 0,083 \cdot 46 = 3,8z \cong 4z \quad (31)$$

Napětí na sekundární straně transformátoru:

$$U_s = U_{vst} \cdot \frac{N_s}{N_p} = 325 \cdot \frac{4}{46} = 28,3V \quad (32)$$

Výpočet špičkového proudu na sekundárním vinutí:

$$I_{s\dot{s}} = I_s \cdot \frac{N_p}{N_s} = 2,2 \cdot \frac{46}{4} = 25,3A \quad (33)$$

Výpočet efektivního proudu na sekundárním vinutí:

$$I_{SP} = I_{s\dot{s}} \cdot \sqrt{(1-s_{\min}) \cdot \left(\frac{K_{RP}^2}{3} - K_{RP} + 1\right)} = 25,3 \cdot \sqrt{(1-0,41) \cdot \left(\frac{0,6^2}{3} - 0,6 + 1\right)} = 14A \quad (34)$$

Výpočet průměru drátu na sekundární vinutí:

$$DIA_s = \sqrt{\frac{4 \cdot CMA \cdot I_{s\dot{s}}}{1,27\pi}} \cdot \frac{25,4}{1000} = \sqrt{\frac{4 \cdot 252 \cdot 14}{1,27\pi}} \cdot \frac{25,4}{1000} = 1,51mm \cong 1,5mm \quad (35)$$

U zvolené frekvence $f=100kHz$, kde už se projevuje skin efekt, je nutno vypočítat hloubku vniku pro kterou platí:

$$\delta = \frac{75}{\sqrt{f}} = \frac{75}{\sqrt{100 \cdot 10^3}} = 0,237 \quad (36)$$

Vodič by neměl přesáhnout průměr $d < 2\delta$, což je $2\delta = 2 \cdot 0,237 = 0,474mm$

Pro sekundární vinutí byl zvolen drát o průměru 0,4 mm, což vyhovuje podmínce $d < 2\delta$, také nesmíme zapomenout, že sekundárním vinutím bude procházet proud o hodnotě 16A, tudíž bylo stočeno 14 jednotlivých vodičů o průměru 0,4 do jednoho vodiče.

Měření

Při měření transformátoru se ověřovaly hodnoty indukce a rozptylové indukce. Měření probíhalo pod odborným dozorem v laboratoři Metrologie na přístroji Agilent E4980A Precision LCR meter.

Měření indukce

Nastavit na přístroji 1V špička-špička, frekvenci spínání což je (v našem případě 100kHz) a měřit s otevřeným sekundárním vinutím a svorky přístroje připojit na primární vinutí.

Hodnota:

$$L = 418,8 \mu\text{H}$$

Vypočtená hodnota indukce transformátoru je $L = 456 \mu\text{H}$ je odlišná od změřené indukce, tento rozdíl nám způsobuje aplikace vzdušné mezery mezi půlky jádra, která redukuje indukci na primárním vinutí. (potvrzeno měřením). Naměřená hodnota L je menší než vypočtená.

Měření rozptylové indukce

Nastavit frekvenci spínání 100kHz, zkratovat sekundární vinutí a připojit svorky přístroje na primární vinutí.

Hodnota:

$$L = 11,90 \mu\text{H}$$

Konstrukce

Ke konstrukci jsou potřeba dvě poloviny jádra ETD39/20/13 z materiálu 3C90, dvě sponky a plastické šestnáctivývodové pouzdro firmy EPCOS - B66364W1016T1 pro jádra ETD, které bylo vybráno společně s jádrem. K navinutí transformátoru použijeme vodič průměru 0,5 mm na primárním vinutí a 14 jednotlivých vodičů o průměru 0,4 mm na sekundární vinutí.

Instrukce k navinutí transformátoru:

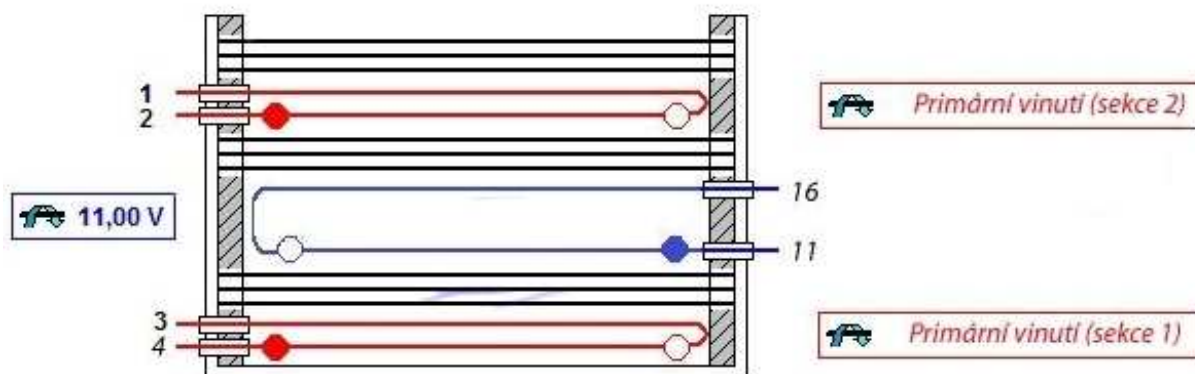
Plastické pouzdro na jádro transformátoru má 16 pinů. Piny 1,2,3,4 jsou použity na primární vinutí a 11,16 na vinutí sekundární.

Primární vinutí je rozděleno kvůli lepšímu chlazení na dvě části, takže piny 2,3 jsou spojeny.

Postup vinutí:

1. Okraje jak na levé tak i na pravé straně 3mm

2. První část primárního vinutí 23 závitů (polovina z 46) je vinuto zleva doprava z pinu číslo 4 a končí na pinu 3
3. Tři vrstvy izolace o šířce 25,7 mm polyesterovou folií
4. Okraje jak na levé tak i na pravé straně 3mm
5. Sekundární vinutí se čtyřmi závity se vine zleva doprava z pinu číslo 11 a končí na pinu číslo 16
6. Tři vrstvy izolace o šířce 25,7 mm polyesterovou folií
7. Okraje jak na levé tak i na pravé straně 3mm
8. Druhá část primárního vinutí , 23 závitů (polovina z 46) je vinuto zleva doprava z pinu číslo 2 a končí na pinu 1
9. Tři vrstvy izolace o šířce 25,7 mm polyesterovou folií



Obr. 18 Zobrazení vinutí transformátoru

5.5. Sekundární část měniče

Dioda výstupního usměrňovače

Dioda výstupního usměrňovače se volí podle napětí na diodě V_{RRM} a proud procházející diodou I_F . Hodnotu napětí V_{RRM} se zjistí pomocí vztahu:

$$V_{RRM} \geq 1,25 \cdot PIU_s \quad (37)$$

$$PIU_s = U_o + \left(U_{\max} \cdot \frac{N_s}{N_p} \right) = 11 + \left(282 \cdot \frac{4}{46} \right) = 35,5V \quad (38)$$

PIU_s ...špičkové napětí na usměrňovací diodě

V_{RRM} ..napětí v propustném směru

Po dosazení do rovnice číslo 37, vychází že V_{RRM} musí být větší nebo rovno 45V. Hodnota proudu I_F se zjistí pomocí vztahu:

$$I_F \geq 2 \cdot I_o \quad (39)$$

Kde I_o je požadovaný proud na výstupu, což je v tomto případě 16A. Tudíž I_D musí být větší nebo rovno 32A. Byla zvolena ultra rychlá dioda STTH6004W.

$I_F[A]$	$V_{RRM}[V]$	$T_j[^\circ C]$	$V_F[V]$	$t_{rr}[ns]$
60	400	175	0,83	50

Tab. 7 Parametry diody STTH6004W [11]

Paralelně k diodě byl přidán odlehčovací obvod složený z rezistoru a kondenzátoru. S ohledem, že dioda má dobu rekuperace 50ns, tak byly zvoleny hodnoty se součinem v nanosekundách. Bylo zvoleno $R_3=360\Omega$ a $C_{15}=33pF$.

Volba vyhlazovací tlumivky a kondenzátorů

Tlumivka a kondenzátory se v obvodu používají pro potlačení zvlnění na výstupu. U tlumivky se uvažuje zvlnění 30% jako u běžných návrhů, jelikož při nabíjení $LiFeYPO_4$ na velikosti zvlnění výstupního proudu příliš nezáleží použije se právě zmíněných 30% zvlnění.

Tlumivka

Převod transformátoru:

$$n = \frac{U_{\min} \cdot s_{\max}}{U_{\text{výst}}} \cdot \eta = \frac{282 \cdot 0,5}{11} \cdot 0,85 = 10,89 \cong 11(-) \quad (40)$$

Výpočet zvlnění na výstupu:

$$\Delta I_L = 0,3 \cdot I_{\text{výst}} = 0,3 \cdot 16 = 4,8A \quad (41)$$

Výpočet maximálního proudu tlumivkou:

$$I_{L\max} = I_o + \frac{\Delta I_L}{2} = 16 + \frac{4,8}{2} = 18,4A \quad (42)$$

Indukčnost tlumivky:

$$L_t = \frac{\frac{U}{n} - U_{\text{výst}} \cdot (1,26)}{\Delta I_L} \cdot s_{\max} \cdot T = \frac{\frac{325}{1089} - 11 \cdot (1,26)}{4,8} \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 10^{-5} = 1,66 \cdot 10^{-5} H = 16,6\mu H \quad (43)$$

Pro tlumivku je použito toroidní jádro ze železo prachového materiálu s ohledem na malé ztráty a vysoké hodnoty sycení z nefunkčního PC ATX zdroje. Pro výpočet závitů bylo nutno změřit permeabilitu jádra tlumivky. Na jádro se navinulo 5 závitů a změřila indukce s výsledkem 2,2uH. Změřili jsme i rozměry jádra tlumivky. Vnější průměr 23mm a průměr vnitřního 14 mm a vypočetla délka l a obsah jádra S . Vypočtený obsah se rovná $63,6mm^2$ a délka 72,2mm.

Při výpočtu permeability vyjdeme ze vztahu:

$$L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot S}{l} \quad (44)$$

po vyjádření u dostaneme:

$$\mu = \frac{L \cdot I}{N^2 \cdot S} = \frac{2,2 \cdot 10^{-6} \cdot 72,2 \cdot 10^{-3}}{5^2 \cdot 63,6 \cdot 10^{-6}} = 9,99 \cdot 10^{-5} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} \quad (45)$$

Vypočítáme relativní permeabilitu:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{9,99 \cdot 10^{-5}}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 79,53 \quad (46)$$

Ze vztahu číslo 44 vyjádříme N:

$$N = \sqrt{\frac{L \cdot I}{\mu \cdot S}} = \sqrt{\frac{16,6 \cdot 72,2 \cdot 10^{-3}}{79,65 \cdot 63,59 \cdot 10^{-6}}} = 15,38z \approx 15z \quad (47)$$

Výpočet závitů byl ověřen měřením a výsledná hodnota $L=16,3\mu\text{H}$.

Volba kondenzátorů

Výstupní kondenzátory patří mezi součástky, které jsou v akumulacním měniči značně namáhány. Kondenzátory se vybírají podle těchto parametrů: kapacita, ESR, zvlnění proudu a samozřejmě i pracovní napětí.

Pro výpočet kapacity je potřeba znát čas vypnutého tranzistoru což je perioda T minus perioda zapnutého tranzistoru $s_{\max}$, výstupní proud I_O a zvlnění napětí na výstupu U_z , které volíme 50mV.

Výpočet kondenzátoru:

$$C = \frac{t_{\text{off}} \cdot I_O}{0,05} = \frac{0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 16}{0,05} = 1,6 \cdot 10^{-3} = 1600\mu\text{F} \quad (48)$$

C.....minimální výstupní kapacita v μF

t_{off} ...čas, kdy je tranzistor vypnutý

I_O ...výstupní proud

U_z ...zvlnění napětí na výstupu

Výpočet napětí:

$$U_c \geq 1,25 \cdot U_o \geq 1,25 \cdot 11 \geq 13,75\text{V} \quad (49)$$

Z rovnice vyplývá, že kondenzátor musí mít větší napětí než 13,75V.

Při výběru kondenzátoru je také potřeba zjistit ESR a zvlnění proudu. Parametr ESR musí být co nejmenší a parametr pro pohlcení zvlnění proudu co největší. Vybrán byl kondenzátor s naddimenzovanou kapacitou vzhledem k minimální vypočtené kapacitě o hodnotě 2200 μF pro napětí 25V.

Rozměry [mm]	Impedance ($\Omega/100\text{kHz}$)		Zvlnění proudu (mA ef./100kHz)	Napětí[V]
	+20°C	-10°C		
12,5x30	0,013	0,033	3630	25

Tab. 8 Parametry kondenzátoru 2200uF/25V

Z tabulky vyplývá, že na pokrytí zvlnění proudu bude potřeba více kondenzátorů zapojené paralelně. V akumulujícím měniči je obvykle zvlnění proudu 1,2 násobek proudu výstupního. Výstupní proud je 16A vynásobíme ho 1,2 a dostaneme proud 19,2A. V tab. 8 se podíváme na hodnotu zvlnění jednoho kondenzátoru a tu vydělíme 19,2A a vyjde nám, že musíme použít pět kondenzátorů zapojených paralelně.

6. Návrh měřících a ochranných obvodů

6.1. Měření napětí

Na výstupu měniče se objeví až 11V, tudíž pro měření napětí na výstupu byly zvoleny dva rezistory zapojeny jako dělič napětí připojených mezi plusem a zemí s dělicím poměrem přibližně 2:1. Jelikož na analogové vstupy desky Arduina se nemůže připojit více jako 5V. Hodnoty rezistorů jsou zvoleny v daném poměru 2:1 s tolerancí výrobce 10%: R4=22K, R5=10k. Výpočtem si můžeme ověřit jaké napětí bude na děliči(přivedeného na analogový vstup desky Arduina), když na výstupu měniče bude 11V:

$$U_d = \frac{U_{\text{výst}} \cdot R_5}{R_4 + R_5} = \frac{11 \cdot 10k}{10k + 22k} = 3,4375V \quad (50)$$

Při maximálním napětí na výstupu bude na děliči napětí 3,4375V, což je méně než požadovaných 5V tudíž hodnoty rezistorů jsou dobře zvoleny.

Analogový vstup Arduina má rozlišení 10bitů což je 1024 různých hodnot. Rezistory mají toleranci 10% Proto pro větší přesnost měření musíme použité resistory změřit.

Měření:

Měření bylo provedeno multimetrem Demestres M3900.

Resistor	Jmenovitá hodnota[kΩ]	Hodnota změřená[kΩ]
R4	22	21,5
R5	10	9,8

Tab. 9 Měření hodnot resistorů použitých v děliči napětí

Po změření hodnot resistorů znovu spočítáme napětí na děliči:

$$U_d = \frac{U_{\text{výst}} \cdot R_5}{R_4 + R_5} = \frac{11 \cdot 9,8k}{9,8k + 21,5k} = 3,4441V \quad (51)$$

Hodnoty napětí odečteme a dostaneme odchylku, kterou bychom měřili, tato odchylka se rovná 6,6mV.

6.2. Měření proudu

Z výstupu měniče poteče proud až 16A, proto byl k měření proudu na výstupu zvolen rezistor o hodnotě $0,01\Omega$, zejména z důvodu co největšího snížení výkonové ztráty. Na tomto rezistoru se měří napětí a zesiluje se operačním zesilovačem INA122, protože na rezistoru je malý úbytek napětí. Zesílené napětí operačním zesilovačem je připojeno na analogový vstup Arduina.

Výpočet úbytku napětí na rezistoru při proudu 16A a 1A:

$$U_{R16A} = R \cdot I_{16A} = 0,01 \cdot 16 = 0,16V \quad (52)$$

$$U_{R1A} = R \cdot I_{1A} = 0,01 \cdot 1 = 0,01V = 10mV \quad (53)$$

Zesilovač INA122 je běžně používán pro zesílení napětí na senzorech a jeho rozlišení se pohybuje v μV , tudíž zesílení 10 bude v našem případě dostatečné. Pro zesílení 10 je potřeba podle katalogu [21] rezistor 40k, jelikož tento rezistor nebyl k dispozici byl použit rezistor o hodnotě 43k. Protože byl zvolen jiný rezistor než 40k musí se dopočítat zesílení:

$$G = 5 + \frac{200k}{43k} = 9,65 \quad (54)$$

To znamená, že zesílené napětí při průchodu proudů 16 A a 1A, budou mít hodnotu:

$$U_{z16A} = G \cdot U_{R16A} = 9,65 \cdot 0,16 = 1,54V \quad (55)$$

$$U_{z1A} = G \cdot U_{R1A} = 9,65 \cdot 0,01 = 0,965V \quad (56)$$

Jak vyplývá z rovnic 55 a 56 při průchodu proudu 16A dostaneme na výstupu zesilovače napětí 1,54V a při proudu 1A napětí 96,5mV. Tyto hodnoty jsou přijatelné vzhledem k tomu, že plošný spoj Arduina má rozlišení analogových vstupů 10bitů.

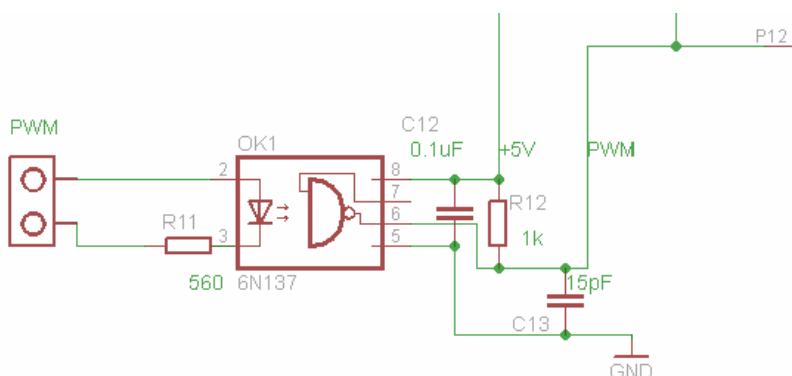
Operační zesilovač INA122 obsahuje na čipu diody, které chrání vnitřní obvody proti zničení. Pokud může být vstupní napětí větší než 0,3V, je vhodné eliminovat proud do operačního zesilovače na hodnotu menší než 5mA pro ochranu vnitřních diod. V našem případě není počítáno s překročením napětí na vstupu operačního zesilovače větším než 0,3V, ale mohou se objevit parazitní jevy nebo případně proud na výstupu může vystoupat na vyšší hodnoty, proto byl zařazen rezistor R6 s hodnotou 22k do série se vstupem operačního zesilovače. [21]

6.3. Ochranné obvody

Optočlen 6N137

6N137 je vysokorychlostní digitální optočlen podporující technologii TTL. Skládající se z GaAsP diody včetně integrovaného fotodetektoru. Slouží pro elektrické oddělení desky Arduina od primární části měniče. Na diodu optočlenu je přiveden signál PWM. Na obr. 19 můžeme vidět typické zapojení podle doporučení v katalogovém listu [22], které je použito v zapojení nabíječky. Toto zapojení obsahuje rezistory R11, R12 a kondenzátory C12 a C13.

Hodnoty rezistorů a kondenzátorů byly zvoleny podle doporučení nebo z grafů katalogového listu.

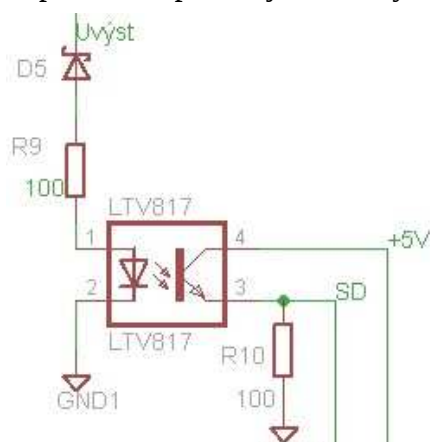


Obr. 19 Doporučené zapojení optočlenu 6N137

Napájení je zajištěno z +5V stabilizátoru, který je na desce plošných spojů a současně napájí i integrovaný obvod IR2110. Na vstup optočlenu se přivede signál PWM. Výstup 6N137 je negovaný a je připojený na vstupy 10 a 12 integrovaného obvodu IR2110 pro řízení spínání tranzistorů.

Ochrana proti přepětí

Slouží k ochraně výstupu měniče před přepětím. Skládá ze zenerovy diody, rezistoru a optočlenu a je připojena na kladnou svorku měniče. Přes zenerovou diodu, rezistor a následně na diodu(vstup) optočlenu. Z výstupu optočlenu signál pokračuje k vývodu SD integrovaného obvodu IR2110, který slouží k zastavení spínání tranzistorů viz. obr. 20. Součet zenerova napětí 9V plus úbytek 1V na rezistoru a 1,5V na diodě optočlenu má hodnotu 11,5V, což je více než požadované napětí. Je tím zajištěno, že se ochrana nebude aktivovat při 11V výstupního napětí, které požadujeme na výstupu měniče.

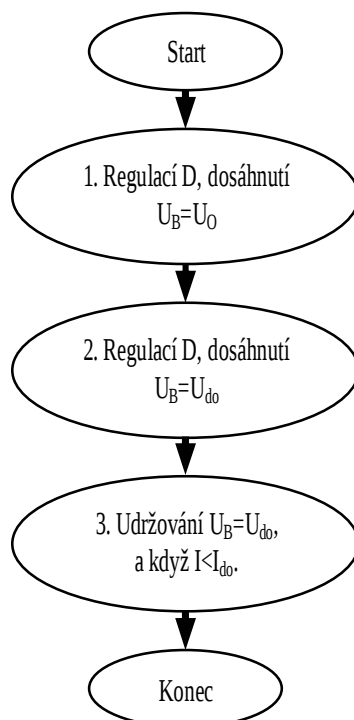


Obr. 20 Ochrana proti přepětí na výstupu měniče

7. Návrh řídicí části

7.1. Popis programu

Program byl vytvořen pomocí Arduina programovacího jazyku (založeném na jazyku Wiring) ve vlastním Arduino vývojovém prostředí. Wiring není ve skutečnosti programovací jazyk, ale jde o knihovnu v C++, která díky různým technikám velmi usnadňuje práci s Arduinem. Na obr. 21 je zjednodušený diagram funkce programu.

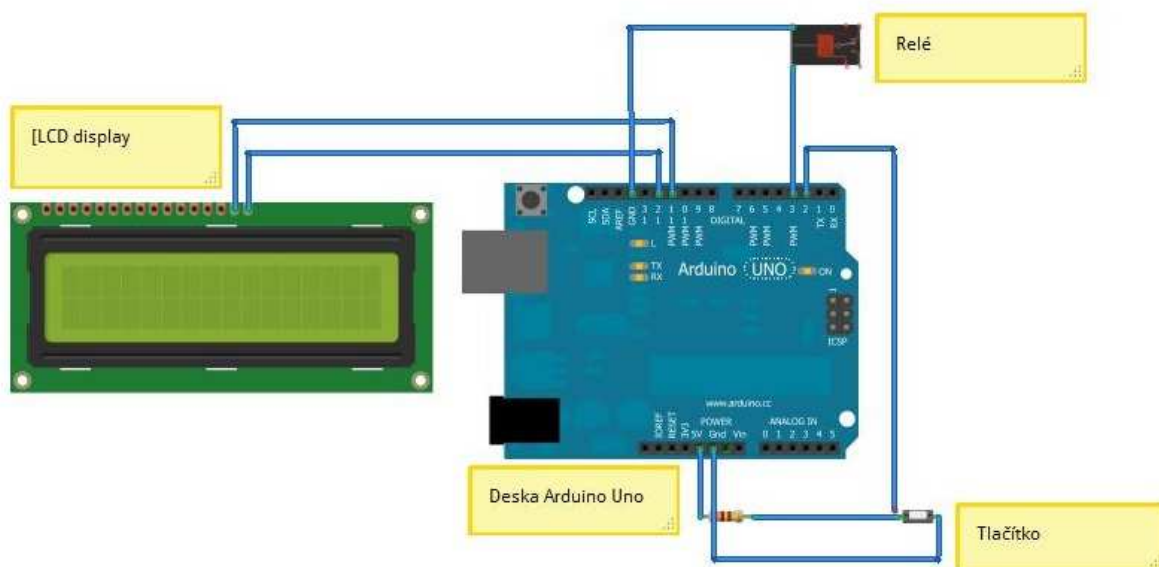


Obr. 21 Zjednodušený diagram programu pro nabíječku(D-šířka pulzu PWM)

Program se skládá ze třech částí viz. kapitola 1.3 Metoda nabíjení, první část programu zvětšuje napětí na výstupu měniče U_O , tak dlouho až dosáhne stejného napětí jako na akumulátoru. Tento krok se provádí, aby nevznikly nechtěné proudy na výstupu měniče. Po dosažení stejného napětí na výstupu měniče jako na akumulátoru se objeví na digitálním výstupu číslo 3 desky Arduina logická jednička, na který je připojeno relé, a relé sepne. Po sepnutí relé, začne nabíjení a program pokračuje do druhé části. V této části program zvětšuje a udržuje napětí na výstupu měniče na hodnotě požadovaného nabíjecího napětí akumulátoru U_{do} . Akumulátor se nabíjí při kontrole nabíjecího proudu I_O a nabíjecího napětí U_O až do doby kdy napětí na akumulátoru U_B dosáhne požadovaného maximálního nabíjecího napětí U_{do} . Po splnění podmínky $U_B=U_{do}$ se dostáváme do třetí části programu, kdy se udržuje napětí U_O na hodnotě U_{do} a nabíjíme konstantním proudem, až do doby kdy začne klesat v závislosti na nabití akumulátoru. Pokud proud klesne pod hodnotu, která je obvykle 10% nabíjecího proudu, nabíjení se ukončí a relé vypne.

7.2. Zapojení obvodu

Na obr. 22 je zapojení desky Arduino Uno a jeho komponenty jako LCD display, relé a tlačítko. Toto zapojení se realizováno v obvodu nabíječky. Relé, slouží k připojení akumulátoru až po vyrovnání potenciálu mezi akumulátorem a výstupem měniče, tak, aby nevznikaly velké proudy mezi měničem a akumulátorem. Tlačítko se používá k zapnutí nabíjení. LCD displej slouží k zobrazování hodnot na výstupu měniče a také další informace jako akumulátor nabit, odpojte baterii a další viz. obr. 23.



Obr. 22 Zapojení desky Arduino Uno a jeho komponentů(LCD, Relé, tlačítko)

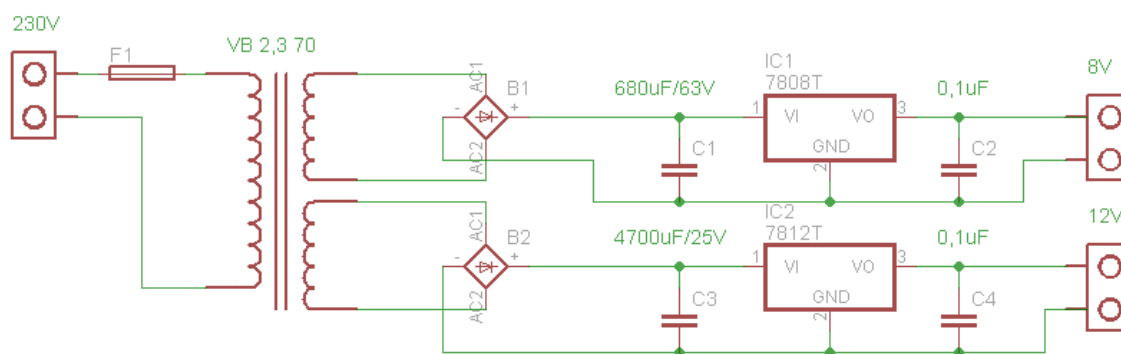


Obr. 23 Fotka displeje nabíječe

Displej na obr. 23 zobrazuje napětí akumulátoru baterie U_B a indikuje, že na výstupu měniče není zapojen akumulátor otázkou "Bateria?".

8. Pomocný zdroj

Slouží jako zdroj napětí pro integrovaný obvod IR2110 a desku Arduino Uno. Výstupní napětí zdroje se volilo pro IR2110 12V a pro desku Arduino Uno 8V. Zdroj je realizován transformátorem s dvěma výstupy, dvěma můstkovými usměrňovači dvěma třísvorkovými stabilizátory s pevnou hodnotou. Pro napětí 12V stabilizátor 7812 a pro napětí 8V stabilizátor 7808 a čtyřmi kondenzátory jak můžeme vidět na obr. 24. Kondenzátory C2 a C4 mají hodnotu 0,1uF a slouží zde jen jako blokovací proti rozkmitání obvodu. Hodnoty filtračních kondenzátorů jsou zvoleny na základě měření.



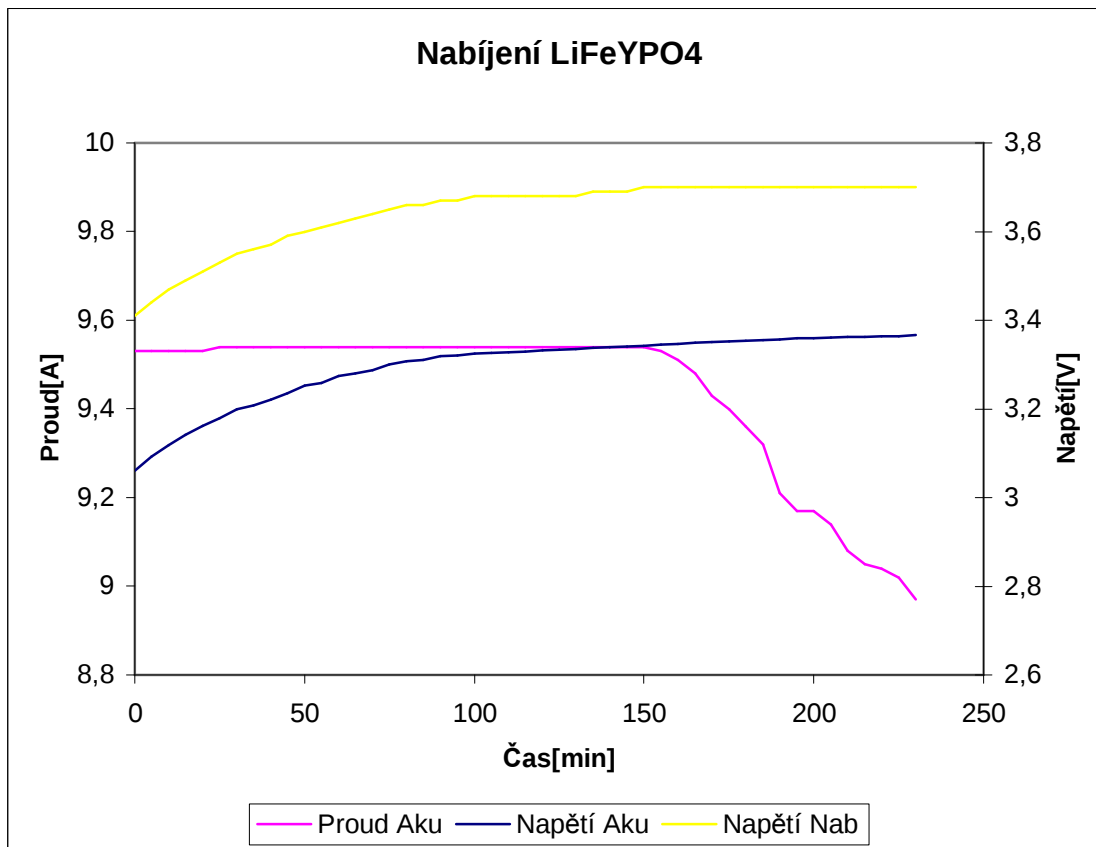
Obr. 24 Pomocný zdroj

9. Plošné spoje

Na kreslení schémat a vytvoření pouzder součástek nabíječky a pomocného zdroje byl použit program Eagle, jelikož jsem neměl k dispozici plnou verzi programu Eagle, ale jen studentskou, tudíž jsem schémata a pouzdra součástek přenesl do programu DesignSpark a v tomto programu jsem vytvořil plošné spoje. Při návrhu byl brán zřetel na to aby byly součástky, které jsou nejvíce namáhané dobře chlazené. Nejkritičtější v tomto ohledu jsou spínací transistory a usměrňovací dioda na sekundární straně měniče. Tyto součástky byly opatřeny standartními chladiči, které rozměrově vyhovovaly pouzdrům součástek. Schéma nabíječky a plošných spojů nabíječky a pomocného zdroje jsou uvedeny v přílohách stejně jako seznam součástek a pohledy na desky plošných spojů ze strany součástek. Rozměry plošných spojů jsou v měřítku 1:1.

10. Ověření funkce

Vzhledem k tomu, že nebyly k dispozici tranzistory s parametry, které byly potřeba k dosažení parametrů na výstupu 11V a 16A, provádělo se nabíjení pouze s proudem 9,5A a napětím 3,5V. Důvodem použití napětí 3,5V je, že se nabíjel pouze jeden akumulátor.



Obr. 25 Graf nabíjení lithiového akumulátoru LiFeYPO₄

Na obr. 25 je zobrazena ukázka nabíjení akumulátoru LiFeYPO₄ zhotovenou nabíječkou, akumulátor se nabíjel ze stavu 3V na nastavený stav 3,35V. Žlutá křivka je napětí na výstupu měniče, modrá křivka je napětí na baterii a fialová křivka je nabíjecí proud. Nabíjení se provádí způsobem popsáným v kapitole 7.1. Začíná stiskem tlačítka, které spustí signál PWM do spínacích tranzistorů. V prvním cyklu se vyrovná napětí na výstupu měniče a na baterii. V našem případě se vyrovnávalo napětí na měniči na hodnotu 3V. Po tomto vyrovnání napětí začne nabíjení konstantním proudem nastaveným na výstupu měniče na hodnotu 9,5A. Aby se dosáhlo konstantního proudu během nabíjení akumulátoru musí se postupně zvyšovat napětí na výstupu měniče. Tento stav trvá až dosáhne napětí akumulátoru nastavené hodnoty v našem případě 3,35V. V tomto bodě nám začne klesat proud a přecházíme do režimu konstantního napětí. Nabíjení se ukončí při dosažení 10% nabíjecího proudu což je v našem případě 0,95A. Tento stav na obrázku není vidět jelikož nabíjení probíhalo jen v době přechodu nabíjení konstantním proudem a nabíjení konstantním napětím.

Jak můžeme vidět na obr. 25 tak rozdíl mezi napětím na měniči a akumulátoru 0,4V. Tento rozdíl nám zajišťuje konstantní proud do akumulátoru. Čím více je akumulátor nabit(má vyšší svorkové napětí), tím více musíme zvyšovat napětí na měniči. Průběhy jsou stejné jen je mezi nimi rozdíl 0,4V.

11. Závěr

Při zpracování této práce jsem se seznámil s charakteristickými vlastnostmi různých druhů lithiových akumulátorů a procesem nabíjení a vybíjení lithiových akumulátorů.

Hlavním cílem bylo navrhnout a sestrojit nabíječku lithiových akumulátorů se zvolenými parametry na výstupu 11V a 16A. Celý návrh počítá s těmito hodnotami. Avšak těchto hodnot jsme nedosáhli, jelikož nebyly k dispozici požadované tranzistory s kterými bychom dosáhli zvolených parametrů.

V teoretické části jsou porovnány lineární a spínané zdroje a následný výběr. Pro sestrojení nabíječky je vhodný spínaný zdroj z důvodu vysoké účinnosti, menších rozměrů a váhy. Pro námi požadovaný výkon 205W, v provedení lineárního zdroje s transformátorem by zdroj dosáhl podstatně vyšších rozměrů a váhy. Dále jsou v práci popsány spínané zdroje a jejich zapojení. Námi vybraný typ zapojení je jednočinný blokující měnič s dvěma tranzistory. Tento typ zapojení je modifikace zapojení jednočinného blokujícího měniče s jedním tranzistorem, který je odvozen z invertujícího měniče se společnou tlumivkou. Pro řízení spínání tranzistoru byl použit integrovaný obvod IR2110, který je zapojen tak aby spínal oba tranzistory současně. Pro ovládání celého měniče slouží mikrokontrolér ATmega328 na plošném spoji Arduino Uno. Ve vývojovém prostředí speciálně určeno pro Arduino Uno, byl napsán program pro nabíjení akumulátorů. Tento program je uložen na přiloženém CD.

Spojením jednočinného blokujícího měniče, řídicího obvodu IR 2110, plošného spoje Arduino Uno, LCD displeje, relé a pomocného zdroje nám vznikla kompletní nabíječka akumulátorů.

V závěrečné části je nabíječka vyzkoušena v praxi, nabíjí se již zmíněný akumulátor LiFePO₄. Nabíjení je podloženo grafem, který nám ukazuje hodnoty akumulátoru v procesu nabíjení.

12. Použitá literatura

- [1] ARDUINO. *Arduino Uno SMD* [online]. 2012 [cit. 2012-03-15]. Dostupné z WWW: <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>
- [2] PAZDERA, Josef. *Nová nabíjecí lithium-iontová baterie pro elektromobily* [online]. 2012 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z WWW: <http://www.osel.cz/index.php?clanek=5719>
- [3] BATERIA. *Lithium - ionový akumulátor (Li-Ion)* [online]. 2012 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z WWW: <http://www.bateria.cz/stranky3/zabava--pouceni/jak-to-funguje-/lithium---ionovy-akumulator-li-ion.htm>
- [4] WIKIPEDIE. *History of the battery* [online]. 2012 [cit. 2012-03-12]. Dostupné z WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_battery
- [5] FOTONMAG. *Bezpečné li-ion akumulátory na bázi LiFePO4* [online]. 2012 [cit. 2012-06-19]. Dostupné z WWW: <http://www.fotonmag.cz/svitilny/baterie/bezpecne-li-ion-akumulatory-na-bazi-lifepo4/>
- [6] VISION. *LYP - LiFeYPO4 (LYP) s příměsí yttria. LYP články 3,2V* [online]. 2009 [cit. 2012-06-15]. Dostupné z WWW: <http://vision-batt.cz/produkty/lyp---lifeypo4-lyp-s-primesi-yttria-lyp--clanky-32v.htm>
- [7] ELEKTROCHEMIE. *Sekundární elektrochemické články*. [online]. 2012 [cit. 2012-03-20]. Dostupné z WWW: <http://www.elektrochemie.zcu.cz/download.php?id=91>
- [8] VANĚK, J; KŘIVÁK, P; NOVÁK, V. *Alternativní zdroje energie*. Elektronické skriptum FEKT VUT v Brně, 2006
- [9] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I*, Nakladatelství BEN, Praha 1996, 351s. ISBN 80-86056-02-3
- [10] *Datasheet KBP301G*
<http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/0dad/0900766b80dadd10.pdf>
- [11] *Datasheet STTH6004W*
http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00074273.pdf
- [12] *ETD39/20/13-3C90*
<http://es.farnell.com/jsp/search/browse.jsp?N=2011+203674&Ntk=gensearch&Ntt=etd39&Ntx=mode+matchallpartial>
- [13] *DESIGN TIPS IR2110*
<http://www.irf.com/technical-info/design/tp/dt98-2.pdf>
- [14] *Application Note AN-978 IR2110*
<http://www.irf.com/technical-info/appnotes/an-978.pdf>

- [15] *Datasheet IR2110*
http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/I/R/2/1/IR2110.shtml
- [16] *UF5408*
http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/U/F/5/4/UF5408.shtml
- [17] *Capacitor Al FR 2200uF 25V (L) 12.5x30*
<http://es.rs-online.com/web/p/aluminio/7083762>
- [18] NOVOTNÝ V., VOREL P., PATOČKA M., *Napájení elektronických zařízení-přednášky*, ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY
- [19] MOHAN Ned, UNDELAND Tore M. , ROBBINS William P; *Power Electronics*, New York,: John Wiley & Sons, inc, 1995, 802 s. ISBN 0-471-58408-8.
- [20] BILLINGS, Keith H.; *Switchmode Power supply handbook*, United States: McGraw-Hill, inc., 1989, 621 s. ISBN 0-07-005330-8
- [21] *Datasheet INA122*
http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/I/N/A/1/INA122.shtml
- [22] *Datasheet 6N137*
http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/6/N/1/3/6N137.shtml
- [23] *Datasheet IRF840*
<http://skory.z-net.hu/alkatresz/IRF840.pdf>

13. Seznam obrázků, tabulek, zkratk a příloh

13.1. Seznam obrázků

Obr. 1 Nabíjecí a vybíjecí proces lithiového článku.....	8
Obr. 2 Vybíjecí křivky lithiového sekundárního článku [7].....	9
Obr. 3 Nabíjecí charakteristiky článku Li-ion [8].....	11
Obr. 7 Nabíjený akumulátor LiFeYPO_4	12
Obr. 4 Příklad lineárního zdroje se dvěma výstupy 12V.....	13
Obr. 5 Blokové schéma spínaného zdroje [9].....	13
Obr. 6 Propustné zapojení s demagnetizačním vinutím [9].....	15
Obr. 7 Akumulující blokující zapojení [9].....	16
Obr. 8 Invertující měnič se společnou tlumivkou (BUCK-BOOST)	16
Obr. 9 Jednočinný blokující měnič [19]	17
Obr. 10 Průběh proudu i_2 režim spjitých proudů	18
Obr. 11 Průběh proudu i_2 režim nespojitých proudů	18
Obr. 12 Blokující měnič s dvěma tranzistory	19
Obr. 13 Arduino Uno SMD [1]	19
Obr. 14 PWM signál získaný příkazem analogWrite() ve vývojovém prostředí Arduino	20
Obr. 15 Typické zapojení integrovaného obvodu IR2110	21
Obr.16: Hysterezní smyčka magneticky měkkého materiálu	25
Obr. 17 Jedna polovina transformátorového jádra rozměry v mm [12]	26
Obr. 18 Zobrazení vinutí transformátoru	30
Obr. 19 Doporučené zapojení optočlenu 6N137.....	35
Obr. 20 Ochrana proti přepětí na výstupu měniče	35
Obr. 21 Zjednodušený diagram programu pro nabíječku(D-šířka pulzu PWM).....	36
Obr. 22 Zapojení desky Arduino Uno a jeho komponentů(LCD, Relé, tlačítko)	37
Obr. 23 Fotka displeje nabíječe	37
Obr. 24 Pomocný zdroj.....	38
Obr. 25 Graf nabíjení lithiového akumulátoru LiFeYPO_4	39

13.2. Seznam tabulek

Tab. 1 Hodnoty nabíjeného akumulátoru LiFeYPO_4	12
Tab. 2 Parametry integrovaného obvodu IR2110	21
Tab. 3 Parametry vysokorychlostní diody s označením UF5408 [16].....	22
Tab. 4 Parametry KBP307G [10]	23
Tab. 5 Parametry vybraného tranzistoru IRF840	24
Tab. 6 Parametry jádra transformátoru ETD39/20/13 z materiálu 3C90 [12]	25
Tab. 7 Parametry diody STTH6004W [11]	31
Tab. 8 Parametry kondenzátoru 2200uF/25V	33
Tab. 9 Měření hodnot resistorů použitých v děliči napětí	33

13.3. Seznam zkratk

LFP	LiFePO_4 akumulátor
LYP	LiFeYPO_4 akumulátor
$\sum l/A[\text{mm}_{-1}]$	Koeficient jádra
$V_e [\text{mm}_3]$	Efektivní objem
$L_e[\text{mm}]$	Efektivní délka
$A_e[\text{mm}]$	Efektivní plocha
$A_{\min}[\text{mm}_2]$	Minimální plocha
$A_L[\text{nH}]$	Efektivní indukce
$m[\text{g}]$	Váha jádra transformátoru
I_d	Proud vstupním usměrňovačem
ESR	Efektivní impedance kondenzátoru
PWM	Pulzně šířková modulace
GaAsP	Galium-arsenit-fosfor

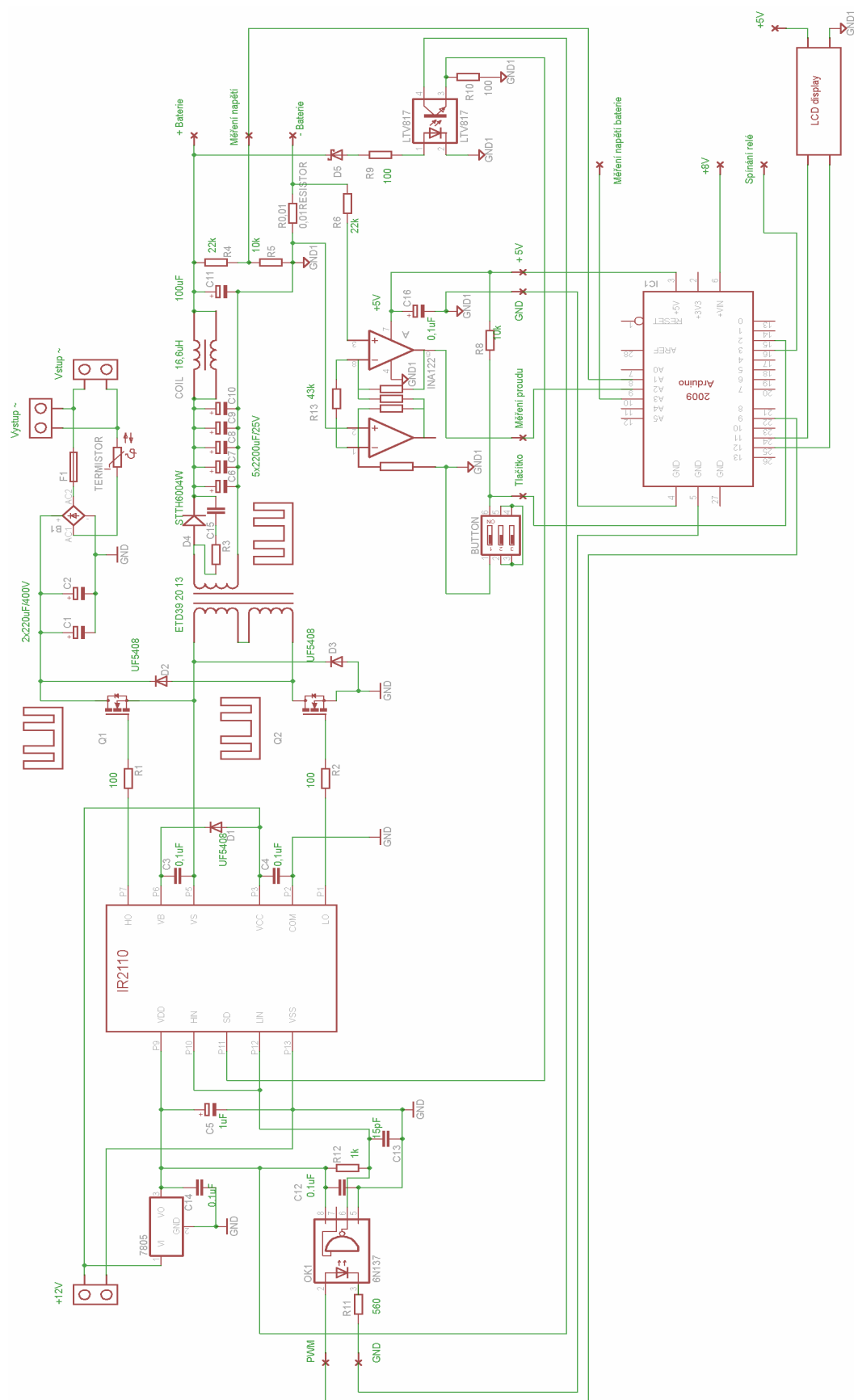
13.4. *Seznam příloh*

Příloha 1	46
Příloha 2	47
Příloha 3	48
Příloha 4	49
Příloha 5	50
Příloha 6	51

CD s dokumentací

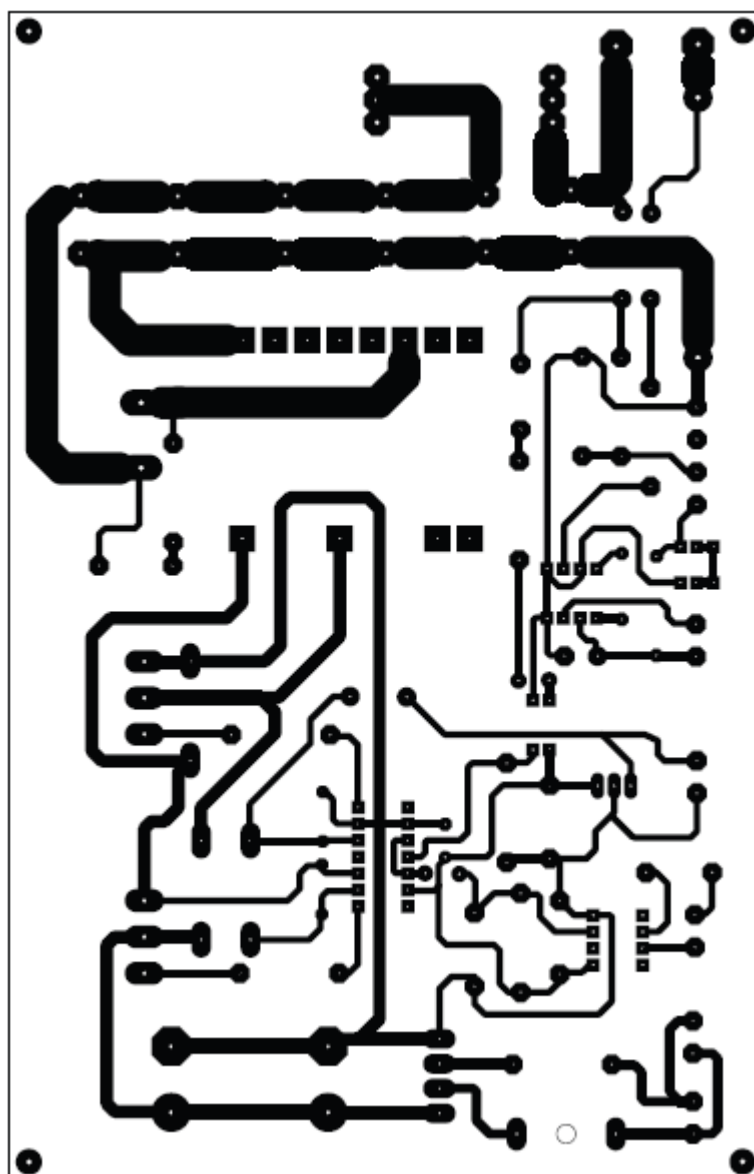
Příloha 1

Schéma nabíječky bez pomocného zdroje



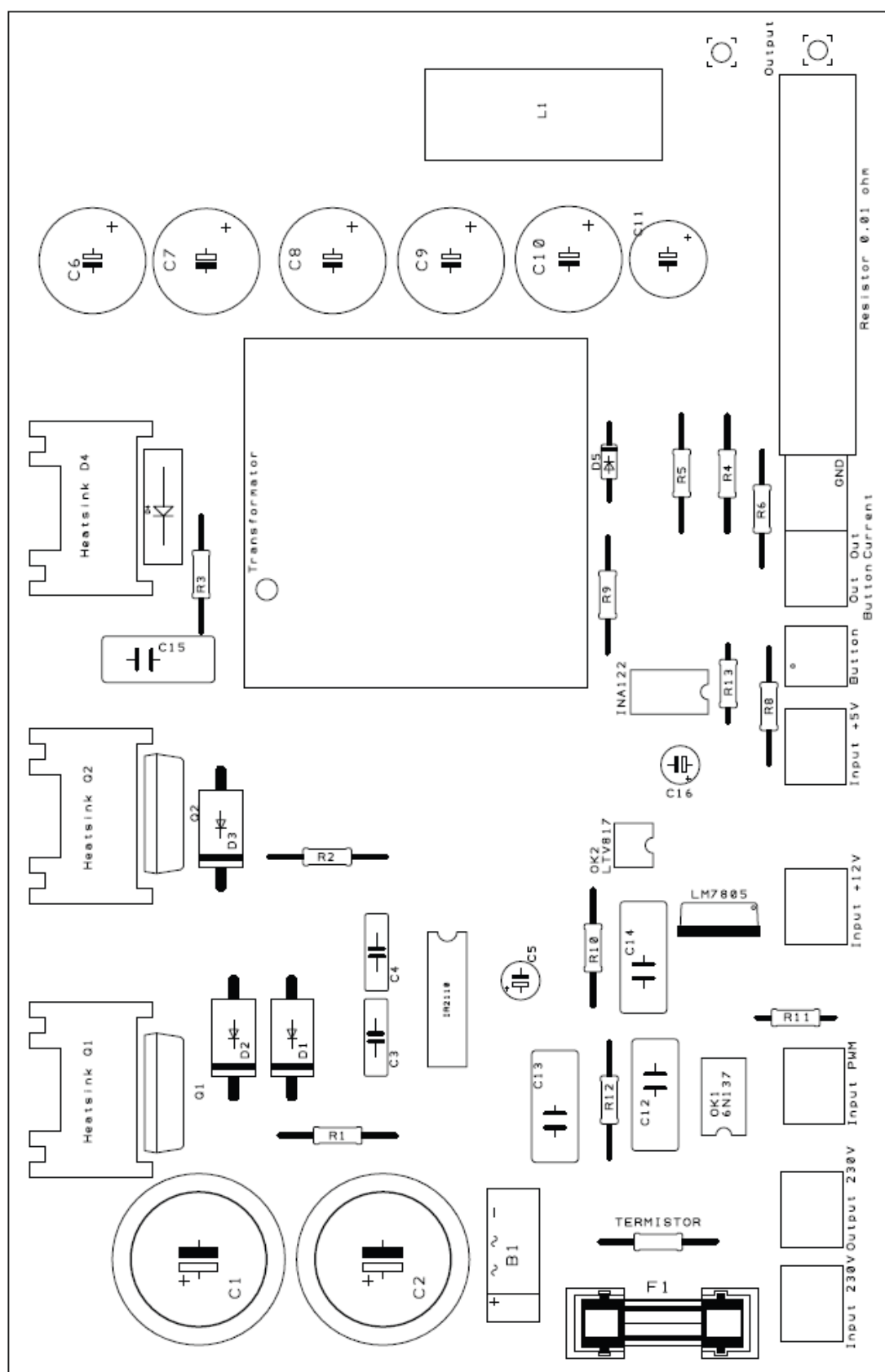
Příloha 2

Nabíječka deska plošných spojů



Příloha 3

Nabíječka osazení strana TOP



Příloha 4

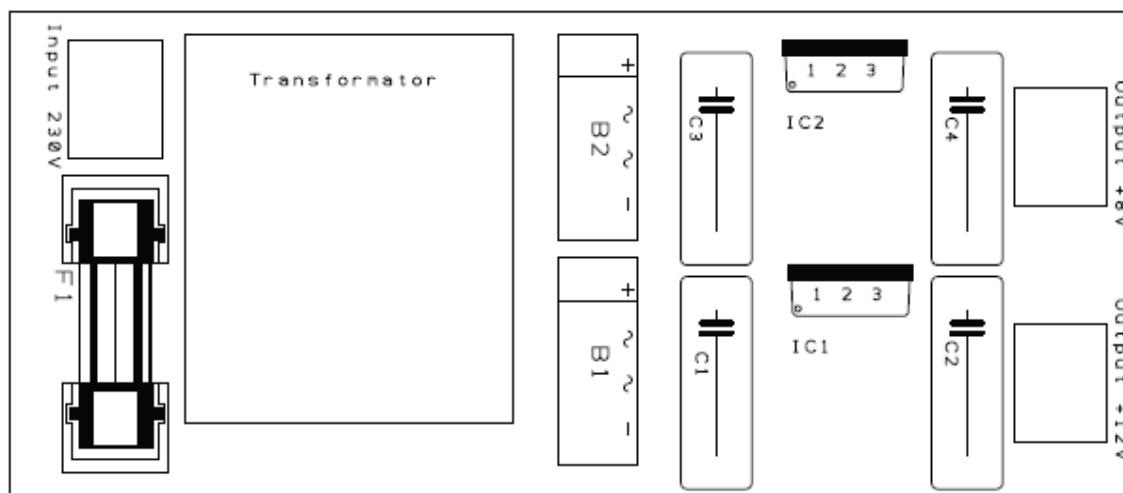
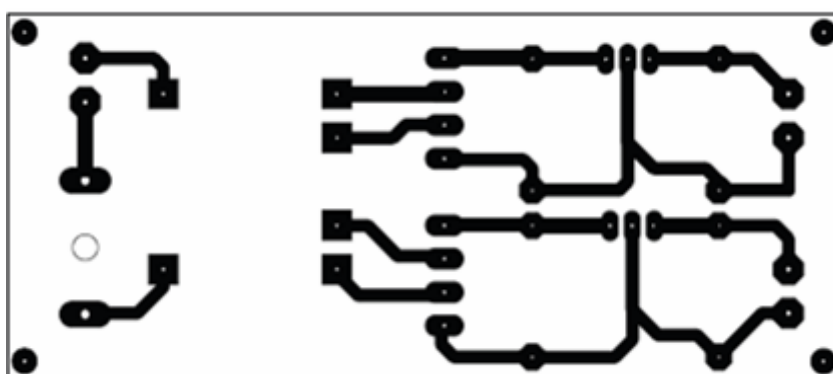
Seznam součástek pro nabíječku

Součástka	Hodnota	Pouzdro
R1, R2, R9, R10	100Ω	0207/15
R5, R8	10k	0207/15
R4, R6	22k	0207/15
R11	560Ω	0207/15
R13	43k	0207/15
R3	360Ω	0207/15
R12	1k	0207/15
C1, C2	220uF/400V	EB22,5D
C3	0,1uF	C7,5B3
C4	2uF	C7,5B3
C5	1uF	E3,5-8
C12	0,1uF	C-EU150
C13	15pF	C-EU150
C14	0,1uF	C-EU150
C16	0,1uF	CPOL-EUE3,5-8
C6, C7, C8, C9, C10	2200uF/25V	CPOL-EUE-13
C11	100uF/16V	CPOL-EUE5-10,5
C15	33pF	C150-0,64x183
D1, D2, D3	UF5408	DO201-15
D4	STTH6004W	DO247
D5	Zenerova dioda 9V	DO35-10
Termistor	10Ω	0207/15
Q1, Q2	IRF840	TO220AB
B1	usměrňovač	2KB
OK1	6N137	DIL08
OK2	LTV817	DIL04
INA122	Operační zesilovač	DIL08
IR2110		DIL14
LM7805		TO220V
Button	Tlačítko	Eagle*
shunt	0,01Ω	Eagle*
COIL	16,3uH	Eagle*
CON	svorka dva kontakty	Eagle*
Transformator	ETD39/20/13	Eagle*
F1	pojistka	GSH15

pozn. *Eagle-součástky vytvořeny v Eagle editoru

Příloha 5

Pomocný zdroj deska plošných spojů a osazení strana TOP



Příloha 6

Seznam součástek pro pomocný zdroj

Součástka	Hodnota	Pouzdro
C1	680uF/63V	C-150-064x183
C2, C4	0,1uF	C-150-064x183
C3	4700uF/25V	C-150-064x183
Transformátor	VB 2,3 70	Eagle
7808T	stabilizátor	TO220H
7812T	stabilizátor	TO220H
CON	svorka dva kontakty	Eagle

pozn. *Eagle-součástky vytvořeny v Eagle editoru