



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky**

Solární regulátor nabíjení

Solar Charge Controller

diplomová práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika (magisterský)

Studijní obor: Elektronika

Vedoucí práce: Ing. Vít Záhlava, CSc.

Jan Soukup

Praha 2013

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra mikroelektroniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. S O U K U P Jan**

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Obor: Elektronika

Název tématu: **Solární regulátor nabíjení**

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku ostrovních fotovoltaických systémů.
2. Navrhněte obvodové elektrické schéma zapojení regulátoru nabíjení akumulátorů.
3. Proveďte obvodové simulace klíčových částí obvodů.
4. Navrhněte desku plošného spoje.
5. Vytvořte potřebné programové vybavení řídicího obvodu.

Seznam odborné literatury:

- [1] Soukup, J.: Sledovač slunce, bakalářská práce, ČVUT v Praze, FEL 2011
- [2] Vobecký J., Záhlava V.: Elektronika – součástky a obvody, principy a příklady, Třetí rozšířené vydání, Grada Publishing, Praha 2005
- [3] Záhlava, V. : Návrh a konstrukce desek plošných spojů, BEN, Praha 2011
- [4] Katalogové a aplikační listy příslušných elektronických součástek

Vedoucí: **Ing. Vít Záhlava, CSc.**

Platnost zadání: 31. 8. 2014

L.S.

Prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
vedoucí katedry

Prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 2. 2013

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jen uvedených pramenů a literatury. Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Praha, prosinec 2013

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu práce Ing. Vítu Záhlavovi, CSc. za významnou pomoc při návrhu schématu, desky plošných spojů a její následné realizaci.

Abstract

The theoretical part collectively describes the elements of off-grid systems and gives the reader a comprehensive overview of their use in practice. The practical part aims to design and implementation of equipment for controlling the charging and discharging of the battery.

Keywords

Solar Charge Controller – off-grid system – battery charging – switched-mode power supply – photovoltaic – Solar Panel – Solar Cell

Abstrakt

Teoretická část práce souhrnně popisuje jednotlivé prvky ostrovních fotovoltaických systémů a dává čtenáři ucelený přehled jejich využití v praxi. Praktická část si klade za cíl návrh a realizaci zařízení zajišťujícího regulaci nabíjení a vybíjení baterie.

Klíčová slova

Solární regulátor nabíjení – ostrovní systém – off-grid systém – dobíjení baterií – spínaný zdroj – fotovoltaika – solární panel

1 Obsah

PROHLÁŠENÍ.....	3
PODĚKOVÁNÍ	4
ZADÁNÍ PRÁCE	5
ABSTRACT	6
KEYWORDS.....	6
ABSTRAKT	6
KLÍČOVÁ SLOVA.....	6
1 OBSAH.....	7
2 ÚVOD	9
3 TEORETICKÁ ČÁST	11
3.1 OSTROVNÍ FOTOVOLTAICKÉ SYSTÉMY	11
3.2 UKLÁDÁNÍ ENERGIE	12
3.2.1 Elektrické baterie	12
3.2.2 Kondenzátory.....	12
3.2.3 Vodní elektrárny	13
3.2.4 Vodík.....	13
3.3 FOTOVOLTAICKÉ PANELE	14
3.3.1 Monokrystalické	14
3.3.2 Polykrystalické	15
3.3.3 Tenkovrstvé.....	15
3.4 SOLÁRNÍ REGULÁTORY	16
3.4.1 První a druhá generace	16
3.4.2 PWM.....	17
3.4.3 MPPT	17
3.5 AKUMULÁTORY	18
3.5.1 Základní informace	18
3.5.2 Rozdělení podle účelu	19
3.5.3 Rozdělení podle provedení	20
3.5.3.1 Uzavřené větrané.....	20
3.5.3.2 Ventilem řízené VRLA – AGM, gelové.....	22
4 PRAKTICKÁ ČÁST.....	23
4.1 OBVODOVÉ SCHÉMA	23
4.1.1 Mikrokontrolér PIC.....	23
4.1.2 Lineární stabilizátory	24
4.1.3 Spínaný zdroj.....	25
4.1.4 Displej	28
4.1.5 Měření proudů a napětí	30
4.2 DESKA PLOŠNÝCH SPOJŮ	33
4.3 VÝROBA ZAŘÍZENÍ	35
4.3.1 DPS	35
4.3.2 Konstrukční box.....	35
4.4 SOFTWARE	38
4.4.1 Hlavní program.....	38
4.4.2 Rutina přerušeni ISR.....	41
4.4.3 Metody.....	43
4.4.4 Makra	44
4.4.5 Komentáře	44
4.5 SIMULACE.....	46
4.5.1 Náhradní obvody	46
4.5.2 Transientní analýza.....	48
4.6 TECHNICKÉ PARAMETRY	50

5	ZÁVĚR.....	51
6	POUŽITÉ PRAMENY A LITERATURA	52
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	55
8	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	56
9	PŘÍLOHY	57
9.1	PŘÍLOHA A – NÁVRH DPS.....	57
9.2	PŘÍLOHA B – OBVODOVÉ ELEKTRICKÉ SCHÉMA.....	60
9.3	PŘÍLOHA C – REALIZACE ZAŘÍZENÍ	63

2 Úvod

Na současném trhu se můžeme setkat s poměrně širokou škálou solárních regulátorů. Cenová nabídka je taktéž rozsáhlá a obecně platí, že za kvalitu si musíme připlatit. V případě požadavku na pokročilé funkce, jako například měření, nastavení nebo zobrazení obvodových veličin, je třeba se poohlédnout po nejvyšších řadách regulátorů. Při volbě je třeba najít kompromis mezi našimi požadavky a cenou.

Mikroprocesorové regulátory jsou současnou špičkou díky možnostem, které uživateli poskytují. Ať už se jedná o nastavení typu baterie za účelem optimalizace průběhu nabíjení, měření a monitoring nebo přenos dat do PC k dalšímu zpracování apod. Díky lepšímu monitoringu umožňují šetrnější zacházení s akumulátory, čímž prodlužují jejich životnost. Kromě základních požadavků na správné hodnoty napětí a proudů také mohou kontrolovat například teplotu baterie. Pomocí algoritmu umožňujícího funkci MPPT zase maximalizují zisk energie z panelů. Co se týče hardwarového vybavení, tak s vývojem elektroniky pochopitelně dochází k neustálému zlepšování použitých obvodů. Samotný princip regulace však prakticky zůstává stejný. Za co se však u drahých produktů připlácí, je obslužný software. Každá firma vyrábějící regulátory si chrání své know-how, které se týká nejenom hardwaru, ale také softwaru. Zatímco hardware může konkurence alespoň částečně napodobit, s ovládacím programem je to složitější. Vývoj spočívá ve zdokonalování algoritmů, které dělají zařízení tím, čím je. Kvalita regulace a vlastně celého procesu nabíjení je dána v první řadě způsobem, jakým je zařízení řízeno obslužným programem.

Pro zvolené téma práce jsem se rozhodl především kvůli propojení alternativních zdrojů energie a elektroniky obecně. Zároveň bych rád nějakým způsobem navázal na svoji bakalářskou práci, která se zabývala sledovačem slunce pro fotovoltaické panely. Přestože jsem chtěl tematicky zůstat u fotovoltaiky, rozhodl jsem se nakonec nepokračovat ve vývoji sledovače. Namísto toho bych chtěl využít nové poznatky z výuky i osobních aktivit a zaměřit se na vývoj takového zařízení, kde je budu moci lépe rozvíjet. Relativně novou zkušeností pro mě bude návrh spínaného zdroje. Moje dosavadní praxe je omezena pouze na použití specializovaných integrovaných obvodů, které zajišťují celou funkci. V zamýšlené aplikaci by však tuto úlohu měl kompletně přebrat mikrokontrolér. Spolu s obsluhou displeje a případně dalších prvků tak bude pro tento účel třeba vytvořit pokročilé programové vybavení.

Koncepce regulátoru by měla svojí jednoduchostí spadat do nejnižší cenové kategorie a zároveň nabídnout některé výhody pokročilých modelů. Hlavní podmínkou je mikroprocesorové

řízení. Díky němu bude zařízení více variabilní a nebude se omezovat pouze na samotnou regulaci. Dalším požadavkem je použití jednoduchého displeje, který výrazně přidá na komfortu ovládání. Implementací displeje se přímo nabízí další funkce, které mohou být v regulátoru zakomponovány. Pro účely regulace bude třeba měřit a zpracovávat obvodové veličiny. Naměřené hodnoty proudů a napětí pak mohou být pro kontrolu zobrazovány. Aby mohl uživatel se zařízením komunikovat, bylo by vhodné připojit také jednoduché ovládací prvky, jako tlačítka nebo klávesnice.

Výsledkem práce by měl být komplexní návrh řešení, které bude založeno na současných trendech v daném oboru. Správnost návrhu by měla být podložena obvodovými simulacemi a případně otestováním funkčního modelu.

3 Teoretická část

3.1 Ostrovní fotovoltaické systémy

Menší solární systémy nejčastěji slouží k zásobování elektrickou energií jednotlivé objekty, na kterých jsou umístěny. Základní rozdělení je na systémy připojené k rozvodné síti elektrické energie a na samostatné systémy pracující izolovaně bez připojení. Pro instalace o středním a vysokém instalovaném výkonu se obvykle předpokládá připojení k síti, neboť vyrobená energie přesahuje energetické potřeby v místě výroby. Rozvodnou elektrickou sítí je pak energie distribuována do míst, kde je možné ji následně spotřebovat. Výkup této energie se řídí zákonem č. 180/2005 Sb. o podpoře využívání obnovitelných zdrojů.

Výroba solární energie je velmi proměnná v čase a obvykle se nekryje s dobou největší poptávky. U ostrovních systémů je proto třeba energii vhodným způsobem skladovat, aby byla k dispozici v případě potřeby. Tyto systémy se obvykle instalují na odlehlých místech, kde není zajištěna distribuce elektřiny. Kromě ostrovů to jsou například venkovské oblasti nebo rozvojové země.

Při návrhu celého systému je třeba důsledně volit jednotlivé komponenty, aby bylo docíleno maximální efektivity. Základním parametrem pro návrh je instalovaný výkon, který se bude odvíjet buď od využitelné plochy pro panely, nebo od finančních limitů na pořízení solárního systému. Zvolenému výkonu je třeba podřídit zbylé součásti sestavy. Typ panelů v dnešní době již nehraje takovou roli, pokud volíme mezi polykrystalickými a monokrystalickými. Rozměry panelů obou typů o stejném výkonu jsou prakticky totožné. Z hlediska životnosti se rozdílily také pomalu vyrovnávají. Pokud nemáme zaručenu ideální orientaci na slunce a převládající přímý svit, je vhodné dát přednost polykrystalickým panelům. Ty mají menší závislost dodávaného výkonu na úhlu dopadu světla a také lépe zpracují difúzní rozptýlené světlo, které převládá při zhoršených klimatických podmínkách.

Další důležitou volbou je typ baterie. Jejich podrobnější rozdělení je uvedeno v kapitole 3.5. Zvolená kapacita by měla být dostatečná pro požadovaný odběr energie. Zároveň však soustava musí být schopna baterie v rozumném čase plně dobít, aby nezůstávaly dlouhodobě vybité. V závislosti na mnoha kritériích volíme regulátor nabíjení. Zohledňujeme především technologii použitých baterií, jejich napětí a maximální nabíjecí proud. Regulátor musí být schopný pracovat se špičkovým výkonem, který je soustava schopna dodat. Na druhou stranu je zbytečné pořizovat předdimenzovaný regulátor, pokud neplánujeme do budoucna rozšíření soustavy. Výkonnější kontrolér bude pochopitelně dražší, čímž se zvýší pořizovací náklady a prodlouží doba finanční návratnosti systému.

3.2 Ukládání energie

Dlouhodobé ukládání většího množství energie je jedním z předních témat v oblasti obnovitelných zdrojů energie. Tato problematika se však netýká pouze tohoto sektoru. Především pro pokrytí energetických špiček, které jsou způsobeny zvýšenou poptávkou, je třeba mít dostatečné zálohy i pro ostatní typy elektráren.

3.2.1 Elektrické baterie

Malé až střední FV systémy pro akumulaci nejčastěji využívají elektrické akumulátorové baterie. Pojem baterie je běžně používán jak pro jednotlivé elektrochemické články, tak pro soustavu složenou z více článků. Pro aplikace s opakovanou zálohou energie jsou využívány tzv. sekundární články, u kterých dochází k vratným elektrochemickým procesům. To v praxi znamená možnost cyklického nabíjení a vybíjení, které je omezené jejich životností. Na trhu je velké množství baterií lišících se chemickým složením, typem pouzdra i použitím. Od toho se odvíjejí další parametry jako jmenovité napětí článku, kapacita, nabíjecí a vybíjecí proudy, cyklická životnost atd. Obecně platí, že každá baterie by měla být provozována pouze takovým způsobem, který je doporučen výrobcem. Nevhodné podmínky použití zpravidla způsobí zkrácení životnosti a předčasný výskyt závad.

3.2.2 Kondenzátory

Pro přímé uložení elektrického náboje ve formě elektrostatického pole slouží kondenzátory. Jedná se o elektrotechnickou součástku, jejíž základní vlastností je kapacita. Vnitřní struktura je odlišná pro jednotlivé typy, ovšem zpravidla se jedná o vrstvené vodivé desky vzájemně oddělené vrstvou dielektrika. Po přiložení napětí na desky dochází k polarizaci dielektrika, čímž dojde k nabití kondenzátoru a uchování náboje. Běžné kondenzátory dosahují malých kapacit a nemohou dlouhodobě dodávat větší množství energie. Speciální technologie výroby nyní umožňují vyrobit vysokokapacitní součástky, tzv. superkapacitory nebo ultrakapacitory. U nich je dosahováno vysokých kapacit výměnou za nižší pracovní napětí. Pro zvýšení kapacity je třeba maximalizovat plochu elektrod, přičemž je zároveň třeba zohlednit vnější rozměry kondenzátoru. To znamená ztenčení vrstev dielektrika, což vede ke snížení elektrické pevnosti a tedy i pracovního napětí. Limitace napětí zde není tak striktní jako v případě baterií, kde je plynovací napětí dáno technologií. Pro aplikace využívající vyšší napětí je třeba použít sériové řazení kondenzátorů. Úměrně s počtem prvků v sérii však klesá celková kapacita řetězce podle rovnice $C=c/N$, kde C je výsledná kapacita řetězce, c kapacita jednotlivých kondenzátorů a N je počet sériových prvků.

3.2.3 Vodní elektrárny

K uchování velkého množství energie jsou v současné době využívány vodní elektrárny. Ty jsou schopny spustit svůj provoz během krátké doby, řádově jednotek minut, a začít dodávat energii do sítě. Tímto způsobem jsou využívány jak klasické říční elektrárny, tak tzv. přečerpávací elektrárny. Jedná se o speciální systém dvou vodních nádrží, mezi kterými je dostatečný výškový rozdíl. Při přebytku energie z ostatních elektráren je voda přečerpávána do vrchní nádrže, čímž je spotřebována elektrická energie za účelem přeměny na potenciální energii vody. Naopak při energetické špičce je voda přepouštěna přes turbínu do spodní nádrže a dochází k výrobě elektrické energie. Tento typ elektráren je budován pouze pro účel uchování energie, nikoli pro klasickou výrobu. Účinnost se u novějších staveb pohybuje okolo 75%.

3.2.4 Vodík

S nástupem alternativních zdrojů jsou stále větší finanční prostředky vkládány do zkoumání možnosti využívání vodíku jako ekologického zdroje energie. Předmětem výzkumu je jak výroba, tak skladování a následná přeměna na využitelnou energii. Vodík je možné získávat z více zdrojů několika způsoby. V současné době výrazně převažuje jeho výroba ze zemního plynu, což je prozatím nejlevnější varianta. Intenzivně se však pracuje na dalších možnostech výroby, které by byly z mnoha hledisek vhodnější. Poměrně dobře zvládnutá je výroba vodíku elektrolýzou z vody, nicméně stále je poměrně nákladná. Nové objevy se týkají například výroby z metanolu, který je pomocí vhodného katalyzátoru snadno přeměnitelný na vodík. Hlavní výhodou je snadná skladovatelnost metanolu, který je při běžných podmínkách kapalný. Oproti tomu skladování vodíku je poměrně náročné jak po technické stránce, tak energetické. Jeho skladování se provádí buď ve speciálních tlakových nádobách, nebo ochlazením na teplotu pod 20,28 K (-252,87 °C), kdy dochází při atmosférickém tlaku k jeho zkapalnění. Pro uložení většího množství jsou obvykle využívány podzemní zásobníky. Těmi mohou být velké tankové nádoby speciálně vyrobené pro tuto aplikaci. Druhou variantou je využití přírodních úložišť, která vzniknou například po odčerpání zemního plynu. Do utěsněné dutiny v zemi je pak načerpán vodík určený k uskladnění.

Vodík je možné využít například ve spalovacích motorech, nebo vodíkových článcích. V prodeji jsou již první modely automobilů využívajících k pohonu právě spalování vodíku. Oproti klasickým fosilním palivům, jako je benzín a nafta, která produkují oxid uhličitý, je odpadní složkou vodíkového pohonu pouze ekologicky nezávadná vodní pára.

3.3 Fotovoltaické panely

Fotovoltaické panely vznikají skládáním jednotlivých fotovoltaických článků. Ty jsou vzájemně spojovány kontaktními pásky, čímž vytvoří společný elektrický obvod. Jednotlivé články v panelu mohou tvořit čistě sériovou, nebo kombinovanou paralelně-sériovou síť.

Při návrhu solárního systému je velice důležité zohlednit možnosti zastínění panelů. Stínit mohou například okolní objekty jako budovy, sloupy, stromy atd. V některých případech si mohou stínit vzájemně panely, nebo části jejich konstrukce. Zastíněním části panelu se nám zmenšuje plocha systému a klesá tedy výkon dodávaný soustavou. To by však ještě nebyl tak zásadní problém, pokud by takové zastínění bylo pouze krátkodobé. Zastíněním článku v panelu dojde k poklesu proudu, který článkem protéká. Pokud jsou všechny články v panelu zapojeny do série, výsledný proud panelu bude odpovídat proudu nejslabším, tedy zastíněným nebo vadným článkem. U článku může dokonce dojít ke změně směru proudu a článek tak začne spotřebovávat proud produkovaný zbylými články. To ovšem může vést k neúměrnému zahřívání daného článku a v krajním případě k jeho zničení. Nejpoužívanějším řešením pro předcházení problémů se zastíněním je použití překlenovacích Bypass diod. Obvykle již bývají implementovány v samotném panelu, nebo mohou přemostňovat jednotlivé panely, pokud jich máme v systému více. Jejich význam spočívá v rozdělení panelu na několik částí, z nichž každá je překlenuta vlastní diodou. Pokud na jedné z částí dojde k zastínění a poklesu proudu, proud ze zbylých nezastíněných částí protéká skrze diodu a neohřívá tedy stíněné články. Na panelu přesto pochopitelně dochází k poklesu výkonu. Jednak z důvodu odpojení zastíněné části a také tepelnými ztrátami na diodě. Nicméně výsledný výkon je stále podstatně vyšší, než bez použití diod. Druhým pozitivem tohoto řešení je ochrana panelu před zničením v důsledku přehřátí článku.

3.3.1 Monokrystalické

První skupinou fotovoltaických článků a panelů jsou monokrystalické. Pro jejich výrobu se používá monokrystal křemíku vyráběný tažením z křemíkové taveniny. Monokrystal je následně pomocí laseru nařezán na tenké destičky. Krystalické články jsou pevné a velmi křehké, musí tedy být v panelu dostatečně chráněny proti okolním vlivům. Tento typ solárních článků je nejnáročnější na výrobu, což se pochopitelně projeví v konečné ceně panelu. Ořezáním na tzv. wafery vzniká velké množství nevyužitého materiálu. Na druhou stranu dosahovaná účinnost je v porovnání s ostatními typy nejlepší.

3.3.2 Polykrystalické

Jinak nazývané multikrystalické články, jsou vyráběny nařezáním křemíkového bloku. Jeho struktura je výrazně členitá, neboť je složen z velkého množství krystalů. Podle jeho struktury ho lze jednoznačně poznat od monokrystalického. Dosahovaná účinnost je oproti monokrystalu nižší, což je ovšem kompenzováno nižší cenou panelů. Polykrystalické panely také lépe zpracují nepřímé difúzní záření než monokrystal. To vzniká rozptylem ze záření přímého v mracích a částech atmosféry a na panel dopadá všemi směry.



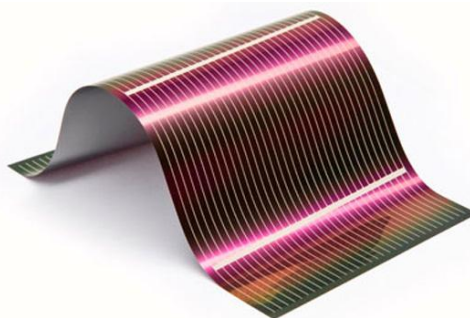
**Poly-Crystalline
Solar Cell**

**Mono-Crystalline
Solar Cell**

Obr.3.1 Polykrystalický a monokrystalický článek. Zdroj: <http://cdn.siliconsolar.com/>

3.3.3 Tenkovrstvé

Tenkovrstvé moduly jsou co do účinnosti výrazně nejhorší ze všech typů. Mají ovšem mnoho výhod, pro které mají na trhu své místo. Články se skládají z tenké vrstvy amorfního křemíku, která je nanášena na prakticky libovolnou nosnou podložku. Podložka může být dokonce pružná, což umožňuje použití ve speciálních aplikacích. Je zde výrazná úspora materiálu, což značně snižuje výrobní náklady. Tenkovrstvou metodou se obvykle nevyrábí jednotlivé články, ale přímo celý modul.



Obr.3.2 Pružný tenkovrstvý článek. Zdroj: <http://web.utk.edu/~opvwshop/>

3.4 Solární regulátory

Protože solární panely i akumulátory jsou prvky čistě pasivní, je třeba do systému zakomponovat řídicí prvek, kterým je regulátor nabíjení. Jeho umístění je na cestě mezi panelem a baterií, případně může sloužit k připojení externích spotřebičů. Základním požadavkem pro každý regulátor je zajištění vhodného způsobu ukládání vyráběné energie do akumulátorů. To znamená ochránit akumulátory před přebíjením a hlubokým vybitím a tím prodloužit jejich životnost. Jejich základní funkcí je regulace a stabilizace napětí a proudu dodávaných panelem do baterie. Pokročilejší regulátory nám pak pomáhají dosáhnout maximální možný zisk energie sledováním bodu maximálního výkonu, informují o stavu soustavy měření příslušných napětí a proudů nebo jsou schopny komunikovat přes datové rozhraní s počítačem. Mezi další pokročilé funkce patří sledování teploty baterie, které umožňuje šetrnější zacházení s akumulátorem. Doporučená nabíjecí charakteristika je závislá na teplotě, při které baterie pracuje. Sledováním a vhodnou úpravou nabíjení tak zásadně prodloužíme životnost baterie.

Ekvalizace je další funkcí sloužící k prodloužení životnosti baterie. Jak již samotný název napovídá, jedná se o vyrovnávání náboje v jednotlivých článcích akumulátoru, nebo celém řetězci spojených baterií. Během provozu totiž může dojít k rozdílnému nabití jednotlivých článků. Následkem toho články s menším nábojem buď nikdy nedosáhnou plného nabití a dochází k poklesu celkové kapacity, nebo jsou naopak přebíjeny více nabitě články a dochází k nevratnému poškození. Plného dobití bývá dosahováno přebíjecím cyklem, kdy je překročeno plynovací napětí a dochází k tvorbě bublinek kyslíku. V tomto nabíjecím režimu je třeba sledovat teplotu baterie a nepřekročit stanovenou dobu nabíjení. Tato funkce je možná výhradně u zaplavených akumulátorů s tekutým elektrolytem. U gelových a AGM baterií je třeba ji deaktivovat, protože by hrozilo poškození, případně i exploze akumulátoru.

Jednotlivé typy regulátorů volíme v závislosti na výkonu systému, míře jeho využití v průběhu roku, typu použitých baterií a dalších aspektech. Jedním ze základních parametrů, podle kterého rozlišujeme regulátory, je maximální hodnota proudu, se kterým jsou schopny pracovat. Tato hodnota by měla být vyšší, než je zkratový proud solární soustavy, aby za žádných podmínek nemohlo dojít k poškození regulátoru. Nevhodně zvolený kontrolér tak může buď zbytečně snižovat výkon celé soustavy, nebo naopak zvýšit celkovou pořizovací cenu.

3.4.1 První a druhá generace

Regulátory tohoto typu pracují pouze v režimu odpojení / připojení panelu k baterii v závislosti na napětí panelu. Součástí zařízení je buď relé, nebo tranzistor plnící funkci spínače obvodu. Hlavním nedostatkem je velmi malá účinnost, která dosahuje svého maxima pouze při optimálních podmínkách, kterých však bývá dosaženo pouze po malou část z doby provo-

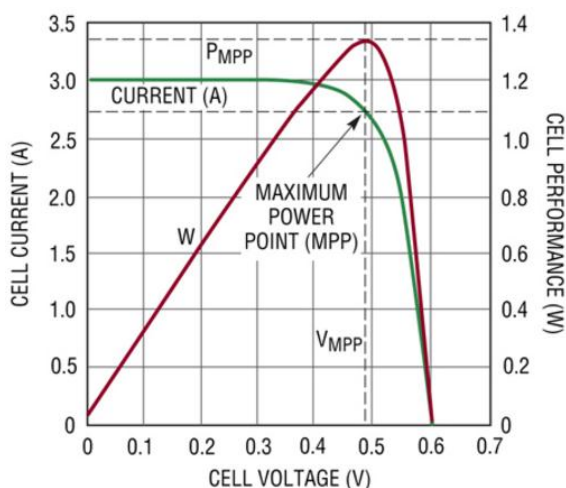
zu. Regulátory obvykle snižují napětí dodávané panelem na hodnotu vhodnou pro baterie. Zároveň však nejsou schopny dodat větší proud, než jaký teče z panelu. Z pohledu fyzikální závislosti, kdy výkon získáme součinem napětí a proudu tedy klesá výstupní výkon a zároveň i účinnost.

3.4.2 PWM

Generace regulátorů pracujících na principu pulzně-šifkové modulace PWM je na dnešním trhu hojně zastoupená. Prakticky jedinou výhodou oproti vyspělejším MPPT regulátorům je jejich nižší cena. Rozhodujeme se pro ně tedy spíše u menších instalací, kde nejsou kladeny takové nároky na účinnost. U větších systémů bychom se však zbytečně připravovali o velkou část výkonu. Jedná se o relativně levná a účinná zařízení, která v současnosti představují jakousi střední cestu. Regulace probíhá formou nabíjecích pulzů vysílaných s frekvencí řádově desítek až stovek kilohertz. S rostoucí šířkou pulzu roste střední hodnota výstupního napětí, která je klíčová pro optimální dobíjení baterie.

3.4.3 MPPT

Regulátory s funkcí sledování bodu maximálního výkonu jsou jakousi nadstavbou PWM regulátorů. Se stále klesající cenou pomalu vytlačují klasické PWM regulátory, které tak ztrácejí svoji hlavní výhodu. Solární panely mají charakteristickou zatěžovací charakteristiku, kterou se tyto regulátory řídí. Cílem je optimalizace zatížení systému, aby bylo dosaženo maximálního zisku energie. Tento bod v zatěžovací charakteristice je časově proměnný v závislosti na několika aspektech, nejdůležitějšími z nich jsou teplota a intenzita ozáření. Regulátor proto neustále vyhodnocuje a přizpůsobuje ideální míru zatížení. Jedná se o řízené DC/DC měniče pracující na vysokých frekvencích, které jsou schopny dosahovat účinnosti okolo 95%. Při snižování napětí z panelů dochází ke zvýšení výstupního proudu a celkový výkon je tedy téměř shodný jak na vstupu, tak výstupu díky minimálním ztrátám na měniči.



Obr.3.3 Zatěžovací charakteristika solárního článku [27]

3.5 Akumulátory

3.5.1 Základní informace

Baterie jsou nedílnou a nezbytnou součástí ostrovního systému, což je zřejmé z principu jeho fungování. Zisk energie je zcela závislý na okolních podmínkách, které prakticky není možné ovlivnit. Doba a objem výroby se odvíjí od slunečního svitu, proto jsme v noci a při vysoké oblačnosti odkázáni na energii naakumulovanou za příznivých podmínek. Jelikož se potřeba energie nemusí časově krýt s dobou výroby, je třeba energii vhodným způsobem uložit pro pozdější využití. Přímé uložení elektrické energie umožňují kapacitory, respektive superkapacitory. V současnosti však především z důvodů špatného poměru kapacita/cena nemají v ostrovních systémech využití. Elektrickou energii je ovšem možné ukládat také přeměnou na jiný typ energie. Nejčastěji využívanou formou ukládání energie je přeměna na energii chemickou, která je uložena v sekundárních článcích. Dodáním elektrické energie dochází k nabíjení článků, ve kterých dochází k chemické reakci. Účinnost takovéto přeměny závisí na typu článku, jeho provedení i na způsobu dobíjení. V případě potřeby jsou články schopny dodat naakumulovanou energii, čímž opět dochází k jejich vybíjení. Tento proces je vratný, nicméně existuje několik faktorů, které zásadně ovlivňují počet cyklů.

Jedním nabíjecím cyklem baterie je myšleno vybití z nabitého stavu na určitou hodnotu kapacity a následné nabití do původního stavu. Míra vybití je označována jako hloubka vybití (Deep of Discharge - DoD) a udává se v procentech kapacity. V závislosti na typu baterie pak hloubka vybití více či méně ovlivňuje životnost baterie. Výrobci akumulátorů obvykle uvádějí dva typy životnosti, mezi nimiž je zásadní rozdíl. Prvním typem je životnost udávaná v letech, která může být poměrně zavádějící. Jedná se o údaj, jak dlouho by měla být baterie schopná provozu, pokud nebude cyklicky zatěžována a budeme ji stále udržovat v nabitém stavu. Jelikož však v ostrovním systému předpokládáme časté nabíjení a vybíjení, zajímá nás především druhý typ životnosti, a sice cyklická. Nejvhodněji bývá udávána prostřednictvím grafu, kde je dáována do závislosti na předpokládané pravidelné hloubce vybití. S rostoucí mírou vybíjení klesá počet cyklů, kterých baterie může dosáhnout. Abychom docílili vyšší životnosti, je třeba při návrhu systému vhodně dimenzovat kapacitu baterie, aby nedocházelo k nadměrnému vybíjení.

Kapacita baterie je dalším důležitým parametrem, který nás při výběru zajímá. Je však třeba rozlišovat mezi několika uváděnými hodnotami. Ty se liší v závislosti na době, po kterou je baterie vybíjena. Zde platí pravidlo, že čím pomalejší vybíjení, tím dosahujeme vyšší kapacity. Toto bývá označováno jako $C_{100} > C_{24} > C_{20} > C_{10} > C_5$, tedy kapacita pro vybíjení po dobu 100, 24, 20, 10 nebo 5 hodin. Při porovnávání různých baterií se tedy musí posuzovat kapacity pro shodný vybíjecí čas. Kapacita se uvádí v jednotkách ampérhodin Ah, případně mili-

ampérhodin mAh u menších akumulátorů. Z hodnoty kapacity tedy můžeme odvodit dobu, po kterou z baterie můžeme odebírat konstantní proud. Důležitou roli zde hraje i parametr označovaný jako konečné vybíjecí napětí, což je předepsaná hodnota napětí článku, resp. baterie, při které je třeba ukončit vybíjení. V grafech bývá tento bod označován jako EV (end-point voltage).

3.5.2 Rozdělení podle účelu

Baterie bez ohledu na použitou technologii dělíme do několika základních kategorií v závislosti na charakteru provozu, pro který jsou určeny. V běžné praxi se pro ostrovní systémy stále využívají baterie startovací, staniční, případně trakční, což obvykle není příliš vhodné. Jedinou zcela vhodnou skupinou jsou baterie speciálně navržené pro cyklický provoz, a sice solární. V následujících několika odstavcích budou jednotlivé kategorie popsány blíže.

První kategorii tvoří autobaterie, označované anglickou zkratkou SLI (Starting, Lighting, Ignition). Jedná se o opravdu velkou skupinu akumulátorů, neboť je nalezneme ve většině současných motorových vozidel. Na tyto baterie jsou kladeny největší nároky zejména při startování, kdy je potřeba opakovaně dodat po krátkou dobu vysoký startovací proud. Během jízdy již jejich práci přejímá alternátor, který baterie zároveň dobíjí. Baterie jsou tak stále udržovány v nabitěm stavu, připraveny na krátkodobé vysoké odběry. Naopak jim nesvědčí časté hluboké vybíjení. Jejich využití pro ostrovní systémy je tedy značně nevhodné, neboť jejich životnost kvůli cyklickému vybíjení nebude velká. Nicméně pro malé systémy bez častého hlubokého vybíjení je možné je použít z důvodu nižší pořizovací ceny. Nejčastější provedení těchto baterií jsou olověné akumulátory, buď se zaplavenými elektrodami, gelem, nebo elektrolytem napuštěným ve skelném rounu. Alternativou mohou být moderní baterie typu LiFePO₄, případně LiFeYPO₄.

Trakční baterie jsou stejně jako SLI baterie využívány především v dopravních prostředcích. Způsob jejich používání je však zcela odlišný. Energie v nich uložená je určena k pohonu stroje po celou dobu jeho provozu. Využití tedy naleznou u elektrických vozíků, elektromobilů, lodí a podobně. Základním předpokladem je zde cyklické hluboké vybíjení a následné dobití do plné kapacity, pokud je v dosahu nabíjecí přípojka. Tento typ baterie má asi nejbližší k solárním bateriím, ovšem mají jeden zásadní nedostatek. Aby nedocházelo ke ztrátě kapacity, a tedy snížení životnosti, je třeba baterie nabíjet až do plné kapacity, což v ostrovním systému není vždy zaručeno.

Třetí skupinou jsou staniční baterie sloužící jako záloha elektrické energie pro případy výpadku sítě. Uplatnění nacházejí v mnoha oblastech, kde je třeba zajistit nepřetržitý provoz, jako jsou nemocnice, elektrárny, telekomunikační centrály, zabezpečovací systémy a mnoho dal-

ších. U těchto baterií je požadována především dlouhá klidová životnost, kdy je baterie udržována v nabitém stavu a k vybití dochází pouze ojediněle v případě potřeby.

Nakonec se po zmínění třech alternativních, pro solární systémy mnohdy nevhodných, typů dostáváme k bateriím speciálně navrženým pro solární účely. Mnoho výrobců a prodejců baterií v současnosti nabízí baterie označované jako „solární“, nicméně některé mohou být takto označovány neprávem, neboť nebyly vyvinuty přímo pro solární účely. Základním předpokladem solární baterie je dlouhá provozní životnost pro hluboké cyklické vybití. Nejdůležitější rozdíl oproti ostatním typům je možnost vybití i částečně nabité baterie, aniž by docházelo k poškození. Toho je docíleno speciální vnitřní konstrukcí, která je navržena pro tento specifický provoz. Dalším parametrem je výkonová hustota. Tato veličina má udávanou jednotku $W \cdot kg^{-1}$ a vyjadřuje velikost výkonu vztaženou k hmotnosti baterie. Spolu s výkonovou hustotou se obvykle uvádí i energetická hustota s jednotkou $W \cdot h \cdot kg^{-1}$, případně $J \cdot kg^{-1}$. Rozsah pracovních teplot je další důležitý parametr, který musíme zvážit při výběru baterie. Jednotlivé typy se v tomto ohledu mohou výrazně lišit, a proto mohou být pro určité aplikace nevhodné. Baterie na okrajích rozsahů pracovních teplot výrazně ztrácí svoji kapacitu a mimo rozsah obvykle nejsou schopny dodat žádnou energii.

3.5.3 Rozdělení podle provedení

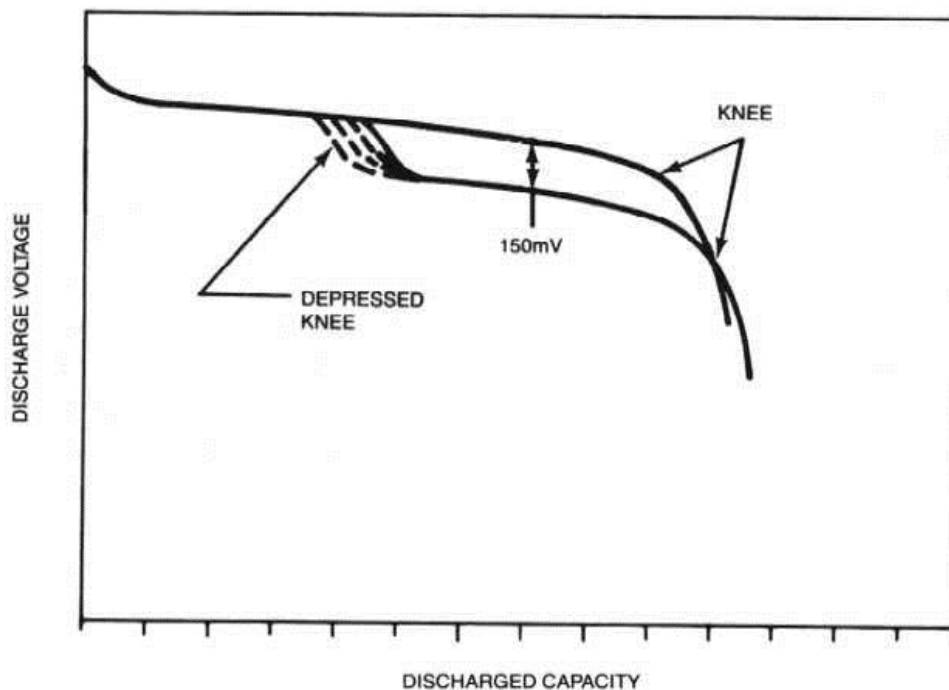
Díky výrazně rostoucímu celosvětovému zájmu o fotovoltaiku dochází v posledních letech k neustálému zdokonalování a vývoji nových technologií i na poli sekundárních článků – akumulátorů. Cílem inovací je především dosažení co největší účinnosti, zvyšování energetické hustoty a omezení nutnosti pravidelné údržby. Při návrhu solárního systému nejsme ve volbě omezeni na jediný typ akumulátoru, ale můžeme si vybrat z rozsáhlé nabídky, kterou dnešní trh nabízí. Vhodný typ zvolíme stanovením klíčových požadavků na systém, jako jsou dodávaný výkon, spotřeba energie, cena, životnost, vlivy prostředí a jiné.

Při pohledu na obal akumulátor můžeme rozlišit dvě základní provedení, a sice uzavřené větrané a ventilem řízené, takzvané bezúdržbové. Uzavřené větrané poznáme na první pohled díky uzavíratelným zátkám určeným k dolévání destilované vody. Pro správnou funkčnost a dosažení požadované životnosti je třeba pravidelně kontrolovat hladinu elektrolytu. U bezúdržbových tato povinnost odpadá a baterie by měly pracovat po celou dobu deklarované životnosti.

3.5.3.1 Uzavřené větrané

Levnější variantou větraných baterií jsou startovací baterie, které jsou však vhodné pouze do nenáročných provozů díky nízké pořizovací ceně. Vhodnější variantou pro naše účely jsou olověné solární baterie standardu OPzS s tekutým elektrolytem se speciálními trubkovými elektrodami, díky kterým dosahují dobré odolnosti v cyklickém provozu. Renomovaný výrobce

Hoppecke chrání aktivní hmotu kladné elektrody tkanou textilií. Výrobce pro tento typ uvádí cyklickou životnost až 1500 cyklů. Mimo olověných se ve větrané podobě vyrábí i nikl kadmiové NiCd. Jejich hlavní výhodou oproti olověným bateriím je možnost ponechání baterií po delší dobu ve vybitém stavu aniž by došlo k poškození. Tato vlastnost bývá uplatňována v provozech, kde není zaručeno pravidelné dobíjení, protože u jiných typů by došlo k nežádoucím nevratným změnám. Díky malému vnitřnímu odporu baterie dobře drží konstantní napětí až do vybití a také je schopna dlouho udržet náboj díky malému samovybití. V souvislosti s tímto typem baterií bývá často zmiňován jev označovaný jako „paměťový efekt“. Kolem tohoto pojmu ve společnosti koluje mnoho mýtů, často podporovaných samotnými prodejci. Tento nežádoucí jev se skutečně může projevit u určitého typu NiCd baterií, nicméně v běžném provozu k němu prakticky nedochází. Předpokladem pro vznik paměťového efektu je mnohonásobné vybití vždy do přesně stejného bodu mírné hloubky vybití a následné pomalé dobíjení. Tím dojde ke změně krystalové struktury záporné elektrody a následkem toho dochází ke vzniku druhého vybíjecího stupně ve vybíjecí charakteristice. Při dosažení zapamatovaného bodu dojde na baterii oproti původní charakteristice k úbytku napětí, řádově sto milivoltů. Běžní uživatelé se ovšem setkávají s podobným efektem, který má za následek vznik druhého vybíjecího stupně, který je zobrazen na obr. č.. Nedochází tím však ke ztrátě kapacity ani nenávratnému poškození, jak bývá často mylně uváděno.



Effect of Long-Term Overcharge at Elevated Temperature

Obr.3.4 Paměťový efekt způsobený přebíjením za zvýšené teploty

Změna charakteristiky bývá způsobena přebíjením baterie, kdy dochází současně ke zvýšení teploty baterie. To způsobují nabíječky s časovým odpojením při nabíjení ne zcela vybité

baterie. Vybíjecí charakteristice lze vrátit původní průběh jedním (případně několika) vybíjecím/nabíjecím cyklem.

3.5.3.2 Ventilem řízené VRLA – AGM, gelové

U těchto typů akumulátorů díky jejich konstrukci není třeba ventilování. Obal proto může být hermeticky uzavřen, což zamezuje možnému úniku elektrolytu. Díky tomu mohou být akumulátory umístěny v libovolné poloze, což je pro mnoho aplikací velká výhoda. Další výhodou je možnost jejich umístění do špatně větraných prostor. Zajímavostí je fakt, že pro tyto baterie je levnější cena přepravy, protože mohou být dopravovány bez zvláštního bezpečnostního zacházení, a to dokonce leteckou poštou. Mnoho bezúdržbových akumulátorů bývá mylně označováno jako gelové, i když produkce AGM je v poměru ke gelovým více než stonásobná.

AGM je zkratka pro Absorbed Glass Mat, volně přeloženo jako baterie s absorpční skleněnou rohoží. Celý elektrolyt je uložen v jakési rohoži, a proto nehrozí jeho vylití ani v případě poškození obalu baterie. Vyšší cena oproti ostatním typům je vyvažována řadou výhod, pro které mohou být v řadě aplikací preferovány. Protože neobsahují kapalinu, která by mohla zmrznout a zvětšit svůj objem, jsou prakticky imunní proti zamrznutí. Použitou technologií bylo docíleno nízkého samovybíjení, které se pohybuje v rozmezí 1 - 3% za měsíc. Nízký vnitřní odpor umožňuje vysoké nabíjecí a vybíjecí proudy aniž by docházelo k výraznému ohřevu baterie. Nabíjecí napětí jsou shodná jako u všech ostatních olověných akumulátorů, takže nemůže nastat problém s nekompatibilitou nabíječe.

Gelové články mají do elektrolytu přimíchán prášek oxidu křemičitého, díky kterému získá právě ona hustou gelovou konzistenci. Bývají proto někdy označovány jako křemíkové baterie. Jejich cena je o něco vyšší, než u AGM. V porovnání s rozměrově totožnou AGM baterií poskytují menší kapacitu. Výhodou jsou mírně vyšší pracovní teploty a především vynikají při pomalém vybíjení. Pro nabíjení je třeba použít nabíječ, který je speciálně určen pro gelové baterie. Při nedodržení nabíjecího profilu totiž hrozí předčasné poškození.

4 Praktická část

4.1 Obvodové schéma

Schéma zapojení sestává z několika dílčích funkčních bloků, které jsou podrobně rozepsány níže. Konkrétně se jedná o mikrokontrolér, spínaný zdroj, měřicí blok, napájení, tlačítka a displej. Všechny části jsou obsluhovány pomocí mikrokontroléru PIC společnosti Microchip. Schéma bylo navrhováno a simulováno v prostředí OrCAD a LTspice.

4.1.1 Mikrokontrolér PIC

Řídící jednotkou celého zařízení je 8bitový mikrokontrolér PIC16F1827. Pod jeho správu spadají všechny ostatní bloky, jak digitální, tak analogové. Samotný čip je umístěn v pouzdru pro povrchovou montáž SOIC s osmnácti vývody. Najdeme zde dva porty po osmi vstupně/výstupních pinech. Zbylé dva piny jsou napájení a zem. Rozsah pracovního napětí je 1,8 V až 5,5 V. Kontrolér využívá interní oscilátor, který dokáže pracovat na taktu až 32 MHz. Pro tuto frekvenci je třeba zajistit napájení nad úrovní 2,5V. Instrukční sada kontroléru obsahuje 49 příkazů. Interní paměť RAM má 384 bytů, datová paměť EEPROM 256 bytů. K dispozici máme celkem dvanáct kanálů pro 10bitový analogově digitální převodník. V aplikaci jsou využity čtyři jeho vstupy. K dispozici jsou čtyři 8bitové (TMR0,TMR2,TM4,TMR6) a jeden 16bitový časovač (TMR1). Další integrovanou funkcí, která byla využita je ECCP. Konkrétně modul Enhanced PWM, který řídí pulzně-šířkovou modulací spínání polomostu.

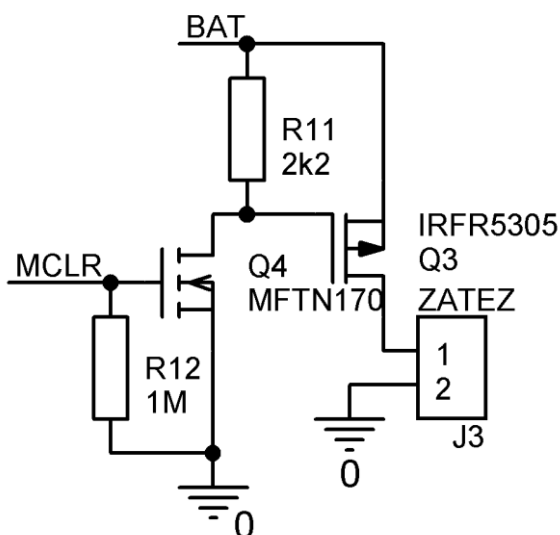
Mikrokontrolér je možné opakovaně programovat na již osazené desce. K tomu slouží konektor ICSP v podobě pěti kulatých plošek v řadě s roztečí 2,54 mm. To odpovídá standardizované rozteči pinů programátoru PICkit 2. Kvalitní kontakt s ploškou zajišťují pružné piny zasunuté v konektoru programátoru, označované jako pogo piny.



Obr.4.1 Pružný pogo pin. Zdroj: Ebay.com

Jedná se o řešení šetřící místo na DPS, které je zároveň nejlevnější, neboť ušetříme absencí konektoru. Nevýhoda spočívá v nutnosti neustále přidržovat piny na ploškách během programování. Doba programování však zabere řádově jen pár sekund.

Mikrokontrolér má vypnutou funkci pinu MCLR umožňující restartování zařízení. Restart je prováděn výhradně odpojením baterie, neboť zde není připojen žádný záložní napájecí zdroj. Pin MCLR však nezůstal bez využití. Naopak bylo třeba, aby plnil jinou funkci. Funkce tohoto pinu jsou značně omezené a navíc zde není možnost nastavení pinu jako výstup. Tento zdánlivý problém však má vcelku elegantní řešení za pomoci externě připojeného mosfetu s N kanálem. U pinu je možné jednoduchým způsobem připojit a odpojit interní pull-up rezistor. Při připojení je na gate mosfetu přivedeno napětí, kterým je otevřen. Naopak při odpojení je gate přes externí pull-down připojeno k zemi a vodivý kanál tranzistoru se zavře. Polem řízený tranzistor proudově nezatěžuje pin, proto není s takovýmto řízením žádný problém. Pouze na tranzistor je kladena podmínka, aby zvládal napětí gate-source přibližně 12V, které se na pinu objeví při programování mikrokontroléru.



Obr.4.2 Zapojení pinu MCLR

4.1.2 Lineární stabilizátory

Pro napájení logických obvodů je třeba zajistit relativně přesný, stabilní, nezarušený a přiměřeně výkonný zdroj. Optimálním řešením byl lineární 3vývodový stabilizátor 7805 s jmenovitým napětím 5V. Přípustná odchylka dle katalogového listu je v rozsahu $\pm 4\%$, tedy $\pm 0,2V$. Výrobce avizovaný výstupní proud činí až 1,5A. Pouzdro TO220 na nekonečném (tedy v reálu dostatečně velkém) chladiči přitom dokáže rozptýlit výkon až 30W. Vstupní napětí je přiváděno z připojené baterie, bez které regulátor není schopný provozu. Maximum vstupního napětí stabilizátoru je 35V, což limituje i použití baterie s vyšším napětím. Napětím z 5voltového stabilizátoru je napájen PIC a další komponenty, jako je logika a podsvícení displeje, driver a senzory proudu.

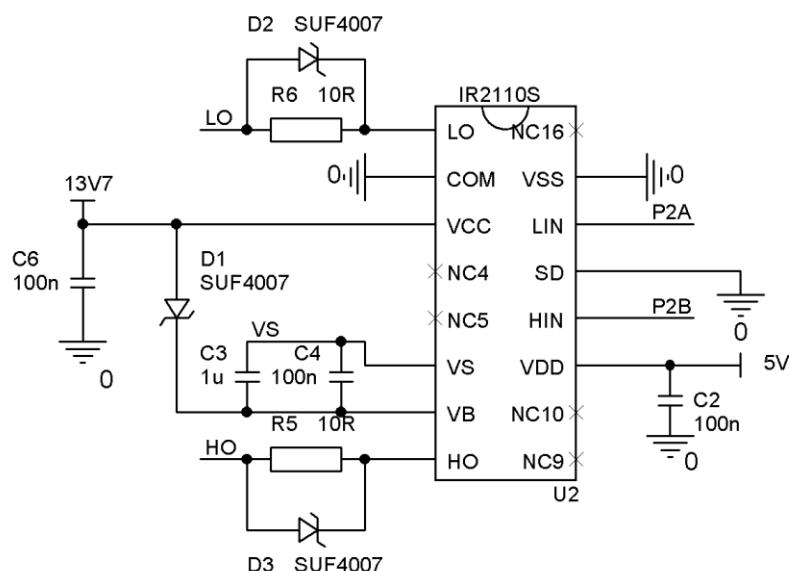
Pro driver bylo třeba zajistit ještě druhý zdroj napětí, kterým je třeba napájet výkonovou část. Rozsah doporučených napětí pro IR2110 na Vcc pinu je od 10 do 20V. Pokud by byla připoje-

na 12, případně 18V baterie, bylo by možné napájet obvod přímo z ní. Pro případy nižšího, nebo naopak vyššího napětí by však obvod buď nepracoval správně, nebo by hrozilo jeho poškození. Z těchto důvodů bylo třeba přidat ještě jeden lineární stabilizátor. Pro tyto účely byl vybrán obvod PB137, který na výstupu stabilizuje napětí 13,7V. Nicméně desku je možné osadit jakýmkoli jiným stabilizátorem v pouzdru TO220, neboť vývody jsou shodné s řadou 78XX. Podmínkou je výstupní napětí v toleranci pro driver, jiný obvod není tímto stabilizátorem napájen. Vstupní napětí obvod získává z připojeného FV panelu. Pokud není panel připojen, nebo nedodává dostatečné napětí, není třeba, aby driver spíнал.

4.1.3 Spínaný zdroj

Ve většině obdobných aplikací bývá požadována úprava napětí směrem dolů, tzv. step-down. Cílem je co možná nejefektivněji snížit a stabilizovat vyšší napětí získané z panelů na hodnotu vhodnou pro nabíjení baterií. Efektivita spočívá v navýšení výstupního proudu oproti vstupnímu. Hlavní výhodou takovýchto měničů je vysoká účinnost a snadná možnost regulace.

Navrhovaný měnič pracuje na principu synchronizované spínání polomostu. Ten je tvořen dvojicí výkonových MOSFET tranzistorů, z nichž jeden bývá označován jako „high side“ a druhý jako „low side“. Pro jejich spínání je použit specializovaný integrovaný obvod, high and low side driver. Ten je přímo určen pro spínání polomostu, kde je zapotřebí plovoucí buzení pro horní tranzistor.



Obr.4.3 Zapojení driveru IR2110S

Synchronní spínání je řízeno pomocí impulsů z mikrokontroléru, které nabývají logických úrovní +5V a 0V. Pro správný chod musí být v první řadě zajištěno, aby nedošlo k současnému sepnutí obou tranzistorů. Tím by byl způsoben zkrat vstupního zdroje vedoucí případně i ke zničení tranzistorů důsledkem průchodu neúměrně velkého proudu. Toto riziko je ošetřeno

softwarově přímo v mikrokontroléru. Doba potřebná k sepnutí tranzistoru není z fyzikálních příčin stejná jako doba, za kterou dojde k jeho vypnutí a tuto skutečnost je proto nutno brát v potaz. Před každým spínáním proto dochází ke krátké prodlevě, označované jako „dead-time“, která zajistí bezpečné vypnutí tranzistoru před sepnutím druhého. Zvolená hodnota vychází z hodnot uvedených v katalogovém listu daných tranzistorů. S ohledem na dostatečnou časovou rezervu a zároveň pro co nejnižší ovlivnění výsledné střidy byla zvolena hodnota 500 ns. Měřením na osciloskopu bylo ověřeno, že tato hodnota byla zvolena vhodně.

Takto navržený spínaný zdroj pracuje ve dvou fázích, které se neustále střídají. V první fázi je sepnutý horní tranzistor a spodní rozepnutý. Dochází k průchodu proudu ze zdroje na vstupu skrze horní tranzistor přes cívku, nabíjí se výstupní kondenzátory. Cívka v tomto režimu pracuje jako spotřebič a akumuluje do svého jádra energii. V druhé fázi je horní tranzistor rozepnutý a spodní sepnutý. V tuto chvíli nepřichází ze zdroje žádný proud. Polarita napětí na cívce se obrátí, ovšem proud protéká stále původním směrem. Z cívky se stává zdroj elektrické energie. Výstupní kondenzátory se vybíjí do připojené zátěže, kterou představuje akumulátor. Obvod se uzavírá přes spodní tranzistor a k němu paralelně připojenou diodu. Tou je veden proud v momentě, kdy ještě není zcela otevřen tranzistor. Některé zdroje pracují pouze s touto diodou. Pro správnou funkci obvodu je postačující. Důvodem, proč je tu zároveň tranzistor, je snížení ztrát a tedy zvýšení účinnosti. Vodivý kanál MOSFET tranzistoru má vzhledem k diodě mnohem menší úbytek napětí a tím pádem i menší výkonové ztráty.

Frekvence spínání měniče je konstantní během celé doby provozu. Její hodnota byla navržena jako určitý kompromis. Z různých důvodů máme zájem o použití co nejmenší cívky, což vede k co možná nejvyšší frekvenci. Frekvence spínání však je omezena několika faktory. Jedním je doba náběžné a sestupné hrany jak u zdroje impulzů, tak driveru tranzistorů. Pro IR2110 je to přibližně 100 ns. Zároveň je třeba počítat s vypínací dobou Mosfet tranzistorů, která může činit například i 200 ns. A v neposlední řadě jsme limitováni možností PWM mikrokontroléru. S rostoucí frekvencí totiž výrazně klesá jeho rozlišení. S malým rozlišením nám výrazně roste krok, s jakým můžeme měnit střidu. Zvolená frekvence nakonec odpovídá 250 kHz, což znamená dobu periody 4 mikrosekundy. Rozlišení v tomto případě činí 7 bitů, tedy 128 hodnot střidy. Takto vysoká frekvence umožňuje použití relativně malé cívky. Během jedné periody je totiž třeba přenést výrazně menší množství energie, než u spínaných zdrojů pracujících na nižších frekvencích. Konstantní spínací frekvence také umožňuje v případě potřeby její snadnější odfiltrování z výstupního napětí.

Samotná regulace a stabilizace napětí je prováděna úpravou střidy spínání tranzistorů. V závislosti na faktorech ovlivňujících výstupní napětí se mění poměr doby sepnutí v rámci trvání celé periody. Při náhlé změně proudového zatížení je třeba střidu vhodně upravit, aby

bylo zajištěno konstantní napětí na výstupu. Výstupní napětí je proto neustále monitorováno a upravováno. Měření probíhá za pomoci odporového děliče napětí a následným zpracováním integrovaným analogově-digitálním převodníkem v mikrokontroléru.

Použitě zapojení bývá označováno jako obousměrný synchronní měnič. Přenos výkonu zde totiž může probíhat v obou směrech. Jedním směrem pracuje ve snižujícím režimu, zatímco opačným ve zvyšujícím. Napětí U_1 je z principu funkce spínaného zdroje vždy vyšší, než U_2 . Obousměrný přenos pro tuto aplikaci není žádoucí, proto je v programu tato možnost eliminována. Při nepřipojeném panelu, nebo jeho nedostatečném napětí by totiž docházelo k přenosu zvýšeného napětí z baterie na vstupní svorku regulátoru. Nicméně možnost obousměrného přenosu výkonu tu zůstává pro případ alternativního využití tohoto zařízení. Úpravou firmwaru mikrokontroléru může být zařízení využíváno jako záložní zdroj. V běžném provozu dochází k dobíjení záložní baterie. Můžeme taktéž řídit nabíjecí proud a sledovat napětí. Při výpadku hlavního napájení dojde automaticky k napájení ze záložní baterie.

Volba cívky připadla na SMD řadu výkonových induktorů od společnosti Vishay. Pomocí kalkulátoru, který je volně k dispozici na stránkách výrobce bylo možné zvolit optimální model. Kalkulátor je zobrazen na Obr.4.4.

Choose Calculator Type		IHL-6767GZ-11 - 15 Buck μ H Ind. Loss Calculator						Ratings		
Buck								Inductance	15	μ H
Choose Available Series								25° C DC Res	0.01370	Ohms
IHL-6767GZ-11		Inputs: Enter data into yellow fields			Outputs			Isat	12.0	Amps
								I(Heat)	14.0	Amps
Select Inductance:		Frequency =	250000	Hz	ET _{dit}	30.59	V-usec			
0.33 μ H		I_{ind} =	10	Amps	F(eff)	159573.1	Hertz			
0.47 μ H		Ambient Temp =	27	°C	Res	0.015917	Ohms			
0.56 μ H		Volts In =	30	Volts	I_{max}	11.02	Amps			
0.82 μ H		Volts Out =	13.8	Volts	I_{min}	8.98	Amps			
1.0 μ H		V_{SW} =	0.08	Volts	I_{ripple}	2.04	Amps			
1.5 μ H		V_D =	0.75	Volts	Duty	0.47				
2.2 μ H					P_{core}	0.510	Watts			
3.3 μ H		ET ₁₀₀ =	10.99	V-usec	P_{dc}	1.592	Watts			
4.7 μ H		B_{pk} =	278.3	G	P_{ac}	0.361	Watts			
5.6 μ H		A	0.675	Inch	17.15	mm	P_{tot}	2.462	Watts	
6.8 μ H		B	0.675	Inch	17.15	mm	Temp. Coeff.	12.9	°C/W	
8.2 μ H		C	0.276	Inch	7.0	mm	Temp Rise	31.8	°C	
10 μ H							Comp Temp	58.8	°C	
15 μ H		Reference Cost	5.5			Compared to IHL-2525CZ-01			Notes May Be Added Here:	
22 μ H				Warning Messages:						
33 μ H										
47 μ H										
56 μ H										
68 μ H										
82 μ H										
100 μ H										

Obr.4.4 Kalkulátor ztrát cívky [25]

Pro výpočty je třeba zadat typ spínaného zdroje, v našem případě Buck – snižující. Poté je třeba vyplnit všechna žlutá pole, která jsou určena k editaci. Volba indukčnosti závisí na požadavcích, které by měl obvod splňovat. Pro menší hodnoty dochází k nadměrným ztrátám

v jádru. Naopak induktory s vyšší indukčností mají nižší saturační proud a také by došlo k jejich přehřátí. Zvolená hodnota 15uH je kompromisem, který pracuje i při proudu 10A a zároveň jeho ztráty v jádře jsou nižší, než u cívek menších indukčností. Zbývá pole kalkulátor dopočítá. Vpravo je zobrazen předpokládaný průběh proudu cívkou při vypočtené střídě 47%.

4.1.4 Displej

U nejlevnějších řad regulátorů nabíjení se s použitím displeje obvykle nesetkáme. Indikace bývá prováděna výhradně pomocí několika led diod a zobrazovací funkce jsou tak omezeny na minimum. V některých případech se můžeme setkat s jednoduchými sedmisegmentovými displeji, případně s alfanumerickými LED displeji. Zde je už možné zobrazit například hodnoty napětí apod. Stále však jsme omezeni na několik málo znaků. V současné době však díky neustále klesající ceně LCD displejů dostáváme zajímavou alternativu. Cena malého LCD displeje s řadičem je srovnatelná se segmentovými LED displeji. Získáme však nesrovnatelně lepší možnosti zobrazení informací o stavu a průběhu nabíjení, nastavení a ovládání zařízení.

Použitý displej v tomto zařízení zobrazuje 16 znaků v řadě na dvou řádcích. Jedná se o typové označení QC1602A, využívající řadič označovaný HD44780. Podsvícení je řešeno LED diodou zakomponovanou v modulu displeje, přičemž znaky jsou bílé na modrém pozadí. Rozlišení jednotlivých znaků je 5x8 obrazových bodů.

Komunikace s displejem probíhá pomocí paralelní sběrnice, a to buď 8bitově, nebo 4bitově. Pro osmibitovou komunikaci je potřeba minimálně 10 datových vodičů. U čtyřbitové si vystačíme pouze se šesti. Při návrhu padla volba na 4bit, především kvůli úspoře čtyř pinů kontroléru. Jedinou zdánlivou výhodou 8bitové konfigurace by mohla být vyšší rychlost datového přenosu. Nicméně v porovnání s časem, který potřebuje řadič pro zpracování dat, je toto urychlení zcela zanedbatelné. Při posílání dat 4bitově je třeba vyslaný byte rozdělit na 4 bity, označované jako „nibbles,“ a vyslat je sběrnici postupně v daném pořadí. Tento úkon je možné v kódu mikrokontroléru zakomponovat na několika řádcích. Nejedná se tedy o nic složitého, kvůli čemu bychom raději volili 8bit.

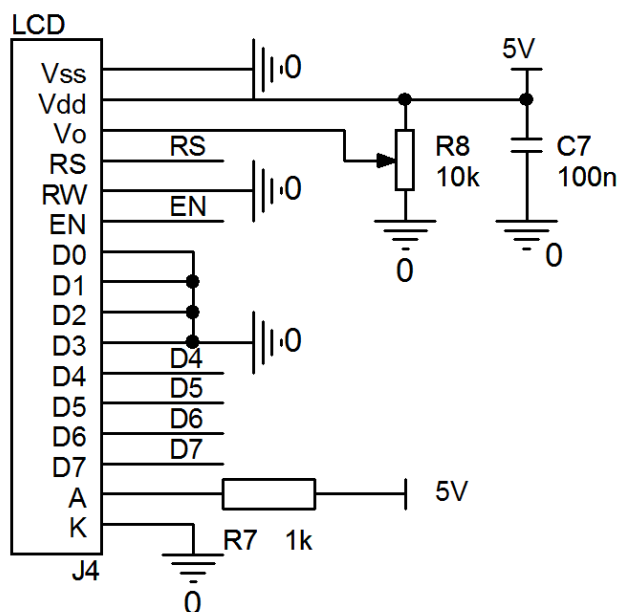
Na desce plošných spojů displejového modulu se nachází celkem šestnáct pinů. Jejich výčet je uveden v Tab. 1

Pin č.	Označení	Popis
1	Vss	Zem napájení logiky
2	Vdd	Napájecí napětí logiky
3	Vo	Nastavení kontrastu
4	RS	Data / instrukce
5	R/W	Zápis / čtení
6	E	Signál povolení
7	DB0	Datový bit 0
8	DB1	Datový bit 1
9	DB2	Datový bit 2
10	DB3	Datový bit 3
11	DB4	Datový bit 4
12	DB5	Datový bit 5
13	DB6	Datový bit 6
14	DB7	Datový bit 7
15	A	Kladné napájení LED podsvícení
16	K	Zem napájení LED podsvícení

Tab.4.1 Označení pinů displeje

Kromě zápisu dat umožňuje displej také čtení zobrazených znaků mikrokontrolérem. V této aplikaci nebyla tato možnost využita a displej trvale pracuje v režimu zápisu. Zobrazená data jsou totiž uložena v mikrokontroléru a připravena pro jejich další zpracování. Tím však ztrácíme možnost čtení „busy flagu,“ což je bit značící probíhající operaci, během které není akceptována žádná další instrukce. Pokud nemáme možnost číst tento flag, je třeba čekat dostatečně dlouhou dobu, než bude původní instrukce dokončena a budeme moci zadat instrukci novou. Tato varianta má jedinou nevýhodu, a sice že se prodlouží doba mezi jednotlivými instrukcemi. Jednotlivé doby provádění operací jsou uvedeny v katalogovém listu a při jejich dodržení nedochází k žádným problémům a zbytečně dlouhým prodlevám.

Displej je vybaven několika typy paměti, a sice CGROM, CGRAM a DDRAM. Zkratka CG znamená „Character Generator“, tedy generátor znaků. Zkratka DD značí „display data,“ tedy data k zobrazení. V paměti CGROM je uložena sada znaků, která se liší daným typem displeje. Každý znak má přiřazen jedinečnou adresu v paměti, díky které ho můžeme zobrazit. Do přepisovatelné paměti CGRAM je možné ukládat vlastní znaky, pokud si nevystačíme se základní sadou. Tímto způsobem je možné vytvořit libovolný znak na úrovni jednotlivých pixelů.



Obr.4.5 Zapojení displeje

Implementace LCD displeje se ukázala jako velký přínos nejenom pro snadnější obsluhu při používání. Během vývoje bylo za pomoci displeje možné mnohem lépe řešit softwarové i hardwarové problémy. Díky jednoduchým testovacím rutinám mohly být zobrazovány stavy jednotlivých registrů a následně porovnány s předpokládanými hodnotami.

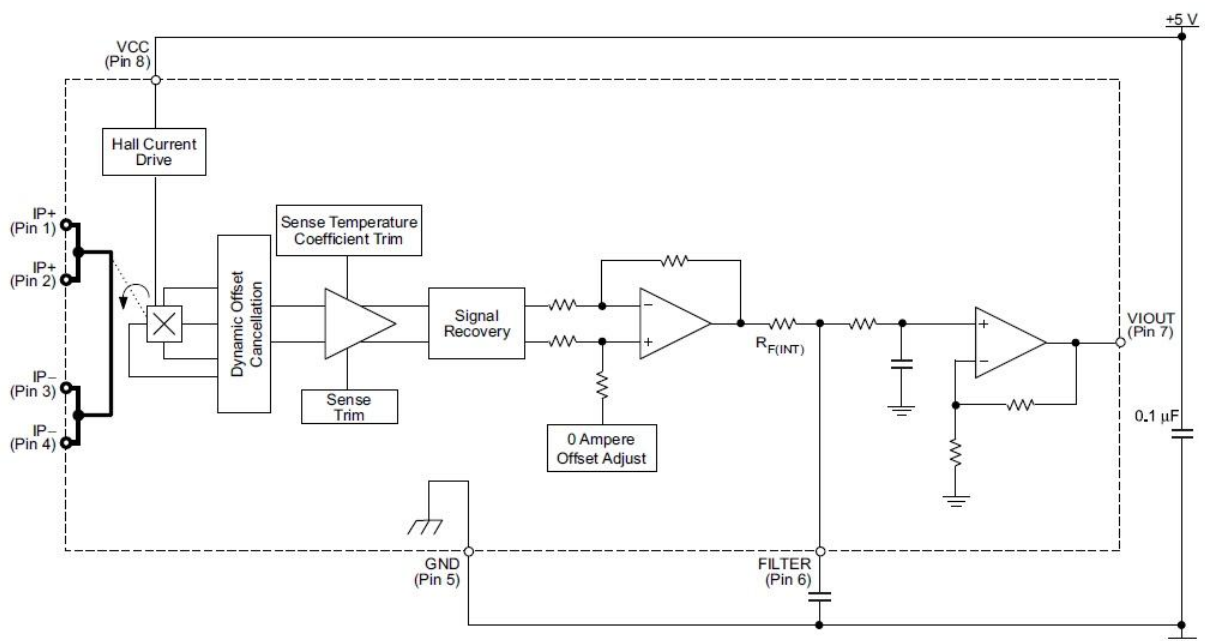
4.1.5 Měření proudů a napětí

Rozlišení převodníku je deset bitů, což nám dává celkem 1024 kvantizačních úrovní. Napěťový rozsah AD převodníku je odvozený od zvoleného referenčního napětí. V navrhované aplikaci nebyl zásadní požadavek na vysokou přesnost měření. Proto bylo pro zjednodušení jako kladné referenční napětí zvoleno napětí napájecí 5V a záporná reference byla přivedena na zem. Přesnost udává výrobce jako $\pm 0,2V$, což odpovídá 4%. Další možností je připojení externí reference na daný pin kontroléru. Tato možnost však vyžaduje další referenční zdroj napětí, což bychom využili při požadavku vyšší přesnosti. Poslední možná reference je interní, u které výrobce pro hodnotu 4,096V slibuje přesnost -8% až +6%. Při daném napětí to odpovídá cca -0,33V až +0,25V. Tato hodnota je však horší, než v případě napájecího napětí. Výhodou by byl snadnější přepočítání v dvojkové soustavě, protože číslo 4096 je dvanáctou mocninou čísla 2.

Měření obvodových veličin je prováděno z důvodů řídicích, ochranných a informativních. Celkem jsou sledovány čtyři obvodové veličiny, a sice vstupní a výstupní napětí spolu se vstupním a výstupním proudem. Všechny veličiny jsou vhodným způsobem převedeny na takové hodnoty napětí, které je schopný zpracovat 10 bitový AD převodník mikrokontroléru. Vstupní rozsah převodníku je od nuly do hodnoty napájení, tedy 5 voltů.

Metod pro měření proudu se nabízelo vícero. Obvykle se k tomuto účelu používá metoda měření úbytku napětí na bočníku. Odpor bočníku bývá velmi malý, řádově jednotky až stovky miliohmů. Nedochozí na něm k velkým úbytkům napětí a tedy ztrátám. Se změnou proudu však dochází pouze k malým změnám napětí. Abychom byli schopni tyto hodnoty měřit s dostatečnou přesností, bylo by zapotřebí napětí vhodně zesílit s důrazem na linearitu. Jednou z možností je pomocí zapojení s operačním zesilovačem.

Elegantnější řešení nabízel integrovaný obvod společnosti Allegro zvládající měření proudu až do 20 Ampér. V aplikaci nakonec byly použity dvě varianty typu ACS712. Na vstupu je použit 5 ampérový a na výstupu 20 ampérový. Obvod k měření využívá Hallova efektu, a je takto schopen měřit jak střídavé, tak stejnosměrné proudy. Odpor v proudové smyčce je velmi nízký, výrobcem uváděná hodnota je 1,2 miliohmů. Napájecí napětí obvodu je 5 V a odvíjí se od něho hodnota výstupu. Když přes proudové svorky neprochází žádný proud, na výstupním pinu se objeví přesně polovina napájecího napětí, tedy 2,5 V. Pokud začne protékat proud, hodnota výstupního napětí se lineárně mění v závislosti na směru proudu. V jednom směru dojde k nárůstu napětí, v druhém naopak k poklesu. IO vyžaduje pouze dvě externí součástky. Tou první je blokovací kondenzátor u napájecího pinu a druhou je filtrační kondenzátor na filtračním pinu. Desetibitový AD převodník nabízí rozlišení 4,9 mV / bit. Protože pro celý proudový rozsah využíváme pouze polovinu z napájecího napětí, máme k dispozici 512 kvantizačních úrovní. Pro 20A variantu tedy měříme s rozlišením 39,1 mA/bit a pro 5A je rozlišení 9,8 mA/bit.



Obr.4.6 Blokové schéma ACS712

V aplikaci jsou měřeny dvě napěťové hodnoty, a sice výstupní napětí fotovoltaického panelu a nabíjecí napětí baterie. Sledování obou napětí je velmi důležité pro řídicí obvody regulátoru.

Napětí jsou dělena v pevném dělicím poměru pomocí rezistorových děličů napětí. Dělicí poměr odpovídá hodnotám použitých rezistorů. Je navržen tak, aby nedošlo k poškození AD převodníku při maximálních předpokládaných napětích a zároveň mohla být využita co největší část z rozsahu měření. Pro maximální napětí vstupu AD převodníku 5V a maximálním měřeným napětím 40V odpovídá dělicí poměr 1:8. Při volbě poměru jsme omezeni na hodnoty odporů odpovídající dané řadě rezistorů a její toleranci. Z důvodu velké tolerance může být do měření zanesena relativně velká chyba, kterou je třeba korigovat softwarově. Naměřená hodnota je v programu upravena vhodným přepočtem na skutečnou zobrazovanou hodnotu. Možností, jak opravit chybu způsobenou nepřesným dělicím poměrem, je upravit ve výpočtu násobící konstantu. Regulátor má pro tento účel naprogramovanou funkci kalibrace. Pro tu nám postačí dostatečně přesný voltmetr, kterým měříme napětí na vstupní, nebo výstupní svorce. Pomocí tlačítek nastavíme hodnotu napětí zobrazovanou na displeji na totožnou hodnotu naměřenou voltmetrem. Nevýhodou této kalibrace je fakt, že po odpojení baterie dojde k vymazání paměti a je počítáno opět s původní hodnotou. Druhou možností kalibrace je úprava konstanty přeprogramováním kontroléru. To ovšem vyžaduje vyjmutí DPS z konstrukční krabice, abychom se dostali k programovacím ploškám umístěným na spodní straně.

Napětí na baterii musí bezpodmínečně splňovat rozmezí dané typem akumulátoru, aby nedocházelo ke snižování jeho životnosti. Shora je omezeno maximálním nabíjecím napětím, které představuje hodnotu tzv. plynovacího napětí. Zdola máme omezení nejnižším vybíjecím napětím, při jehož dosažení je třeba baterii přestat vybíjet. Spolu s výsledky měření proudového zatížení je možné dopočítat dodávaný výkon, který odpovídá součinu obou hodnot.

4.2 Deska plošných spojů

Celý návrh byl proveden v prostředí PCB Editor společnosti Cadence. Rozmístění součástek i následné routování, tedy tvorba spojů, bylo prováděno ručně. Oproti autorouteru je možné dosáhnout vhodnějšího rozmístění pro správnou funkci obvodu. Při návrhu bylo třeba dbát především na doporučení výrobců součástek, elektromagnetickou kompatibilitu a v neposlední řadě na zvolený rozměr DPS a montážní krabice.

U návrhu se od počátku počítalo s profesionální výrobou u společnosti Pragoboard, zabývající se výrobou plošných spojů. Pro prototypovou výrobu v řádu několika kusů DPS nabízí výrobu formou POOL servisu. Při ní nejsou vyráběny a uchovávány filmové předlohy, což ušetří část výrobních nákladů. Pro tento způsob výroby má společnost dané parametry, které je třeba dodržet. Za každý nadstandard jsou účtovány příplatky. V tabulce Tab.4.2 jsou uvedeny základní parametry a požadavky pro navrhovanou desku.

materiál FR4 1,5mm 18um Cu (základ)
nepájivá maska 1-2x (zelená barva)
servisní potisk 1-2x (bílá barva) - druhý potisk za příplatek
elektrické testování
H.A.S.L. (bezolovnatý HAL) nebo chemické zlacení
obdélníkové frézování vnějšího obrysu (použitá fréza 2,4mm)
spoj/mezera $\geq 150\mu\text{m}$, vrták $\geq 0,3\text{mm}$

Tab.4.2 Parametry pro POOL servis – Pragoboard [22]

Před samotným návrhem desky bylo třeba v programu vytvořit pouzdra použitých součástek. Pájecí plošky, rozměry pouzder i umístění nepájivé masky vychází z doporučení v katalogových listech výrobců součástek. Při návrhu bylo počítáno s ručním osazováním hrotovou pájkou, pájecí plošky proto dostatečně přesahují vývody součástek pro pohodlné zapájení. Při tvorbě pouzder je velmi důležité dodržet správné značení a číslování vývodů součástek, a to jak ve schématu, tak v návrhu DPS.

Šířka vodivých cest spolu s rozměry prokovů byla volena s ohledem na předpokládané proudové zatížení. S tím přímo souvisí ztrátový výkon spojů, které mají elektrický odpor daný jejich průřezem a použitým vodivým materiálem. V našem případě se jedná o měď tloušťky 18um. Tyto ztráty se projeví ohřátím spojů, což by v extrémních případech mohlo vést ke zničení desky. Míra ohřátí byla počítána pomocí volně dostupného kalkulátoru [21].

Pro omezení rušivých vlivů, na které jsou citlivé především digitální obvody mikrokontroléru a displeje, má rozmístění součástek na desce svá opodstatnění. Nejvíce rušivým elementem

ve schématu je patrně cívka, a to i přesto, že je ve stíněném pouzdře. Nachází se proto na opačném konci desky než citlivé obvody. S ohledem na rozměry součástek byl kladen důraz na minimalizaci plochy proudových smyček, čímž je potlačeno elektromagnetické vyzařování.

Finální deska je dvouvrstvá, označení stran je pro vrchní TOP a spodní BOTTOM. Při rozmístování součástek bylo třeba, mimo jiné, brát ohled na výšku pouzder. Na spodní straně se nachází pouze nízké součástky. Je to dáno umístěním DPS blízko dna konstrukčního boxu. Maximální možná výška je přibližně 4 mm. Všechny větší součástky jsou proto na vrchní straně.

Součástí návrhu je také vrstva servisního potisku. Ten slouží jak k usnadnění práce při osazování, tak při pozdější vizuální kontrole desky. Použitá barva je zpravidla bílá. Do potisku je zahrnuto označení jednotlivých součástek a obrysy jejich pouzder. Integrované obvody mají značku určující jejich správnou orientaci. U diod je doplněno označení polarity, stejně jako v případě elektrolytických nebo tantalových kondenzátorů. Programovací konektor má označen první pin šipkou.

V průběhu návrhu a především po dokončení bylo třeba pracovat s nástrojem DRC, který kontroluje předem nastavené parametry týkající se návrhu. Jedná se například o izolační mezery, šířky spojů, překrytí pouzder součástek apod. Předvedeme tím možným problémům při generaci výrobních dat, výrobě, nebo při samotném provozu výsledného zařízení. Další užitečná sada automatických kontrol se nazývá Quick Reports. Nalezneme zde jednoduché výpisy týkající se návrhu. Z nejdůležitějších to je výpis nepřipojených pinů, neumístěných součástek, nepřipojených cest nebo chyb v návrhových pravidlech. Z dalších můžeme jmenovat výpis součástek, jednotlivých pinů, prokovů, délek spojů atd.

Po důkladné kontrole bylo možné přistoupit k závěrečnému kroku samotného návrhu, a sice generování výrobních dat. Data pro vrtačku byla podle požadavků výrobce generována ve formátu Excellon a gerber data RS274-X. Označení souborů jsou uvedena v tabulce Tab.4.3.

Vrstva	Soubor
TOP	top.gbr
BOT	bot.gbr
maska TOP	smt.gbr
maska BOT	smb.gbr
potisk BOT	plb.gbr
obrys	mill.gbr
prokovené vrtání	pth.exc

Tab.4.3 Označení souborů pro výrobu

4.3 Výroba zařízení

Celý projekt byl vyráběn ve formě prototypu v podmínkách domácí dílny. Pouze výroba finální DPS byla provedena zakázkově u společnosti Pragoboard. Návrh desky, stejně jako volba použitých součástek nebo montážní krabice, byl přizpůsoben dostupnosti na českém trhu.

4.3.1 DPS

Vývojové verze desky byly vyráběny v dílně metodou fotocesty za použití negativní fotocitlivé fólie a následném leptání mědi v chloridu železitém. Původní návrh byl pro jednoduchost výroby v podobě jednovrstvé desky o rozměrech cca 65 x 75 mm. Po otestování funkčnosti jednotlivých bloků bylo možné přistoupit k návrhu preciznější dvouvrstvé desky v třídě přesnosti 5. Do výroby byl objednána panel se třemi kusy DPS na vylamovacích můstcích. Před osazováním bylo třeba desku vylomit z panelu a začistit otřepy po můstcích. DPS je po vyrobení elektricky testována, čímž je zaručeno neporušení vodivých spojů.

Připravenou desku bylo možné začít osazovat součástkami podle osazovacího plánu, který je součástí návrhu desky. Osazování probíhalo postupně po jednotlivých blocích, aby bylo možné postupně proměřovat důležité části desky a odhalit tak případné chyby v návrhu, nebo vzniklé při osazování. Potenciální chyby vznikající při pájení jsou z velké míry eliminovány nepájivou maskou, která zabrání přilnutí cínu mimo pájecí plošky.

Během osazování se uplatnily jednoduché testovací rutiny pro mikrokontrolér, aby bylo možné proměřit jednotlivé periferie. Po postupném ožívání jednotlivých částí bylo možné předpokládat správnou funkci celého zařízení. Měření byla prováděna pomocí voltmetru a analogového osciloskopu.

4.3.2 Konstrukční box

Pro umístění regulátoru byla zvolena univerzální montážní krabice z hliníku. Rozměry desky, stejně jako rozmístění konektorů, tlačítek a svorkovnic, byly přizpůsobeny pro danou krabici. DPS je zasunuta do drážek v profilu, čímž je zajištěna proti pohybu. Pro displej bylo třeba v čele krabice vytvořit odpovídající otvor a připevnit ho ke krabici pomocí oboustranné lepicí pásky. Další otvory bylo třeba vytvořit pro tlačítka, která byla pro jednoduchost navržena kulatá. Přístup také bylo třeba udělat ke svorkovnicím a k regulaci kontrastu displeje v podobě trimru.

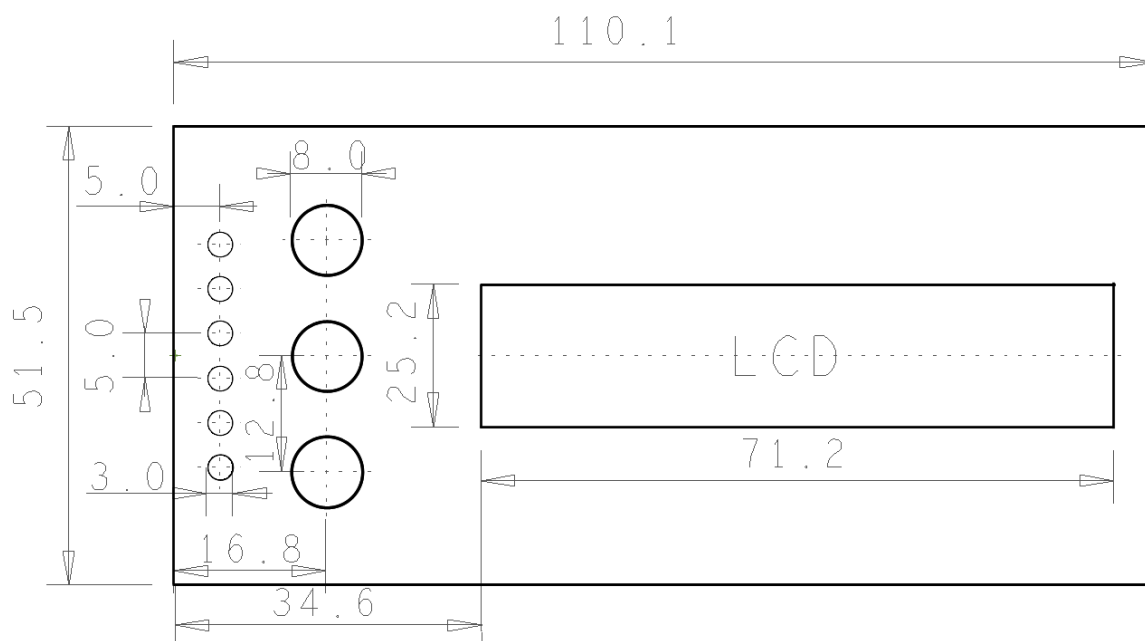
Kromě ochranné funkce vůči mechanickým vlivům prostředí plní krabice také ochranu před elektromagnetickým zářením. U elektronických zařízení uváděných na trh se testuje takzvaná elektromagnetická kompatibilita EMC. Jedná se o měření zjišťující, jakým způsobem dané zařízení vyzařuje do okolí a zároveň jak je náchylné na cizí rušení z okolního prostředí. Intenzita rušivého signálu by měla být v celém spektru měřených frekvencí pod úrovní danou normou.

Normy se liší v závislosti na typu a použití výrobku. Vodivé hliníkové pouzdro funguje na principu Faradayovy klece. Dobře tedy stíní záření jak zevnitř ven, tak obráceně.

Odstínění není pochopitelně dokonalé, neboť každá nehomogenita tvoří anténu, která může vyzařovat. Jednotlivé části krytu nemusí být vždy dobře elektricky propojené a není tak dosaženo celkového efektivního stínění. Příčinou může být například nevodivá povrchová úprava kovových částí. Elektrické propojení bývá často zajišťováno prostřednictvím mechanických spojů, jako jsou například šrouby, podložky a matice. Pro dobrý elektrický kontakt se používají tzv. vějířové pojistné podložky, které mají za úkol se „zakousnout“ do materiálu. V případě nevodivé povrchové úpravy však není zajištěno, že jí podložka pronikne a dojde k vytvoření vodivého kontaktu.

Největší problém však nastává tam, kde zařízení přichází do styku s uživatelem. Těmito kritickými místy jsou například tlačítka, klávesnice, displeje nebo konektory. Pro jejich zpřístupnění je třeba vytvořit v krytu otvory, které se stávají bránou pro průchod elektromagnetického záření. Ještě horším nebezpečím pro zařízení je ESD, neboli elektrostatický výboj. Ten může nastat pouhým dotykem uživatele, který je nabitý elektrostatickým nábojem. Pro citlivé obvody to může znamenat jejich destrukci. Pro ošetření těchto rušivých elementů je třeba vhodným způsobem odstínit vzniklé otvory. Jedním z možných způsobů je umístění vodivé desky, elektricky dobře propojené s krytem, za displej, či klávesnici. Deska by měla rozměrově odpovídat velikosti otvoru, nebo v lepším případě ho přesahovat.

Kovový kryt má ještě další funkci, a sice jako pasivní chladič pro lineární stabilizátory. Ty jsou ke stěně krytu připevněny šrouby s izolačními podložkami, aby nedošlo k vodivému spojení součástky s krytem. Vodivé plošky součástek jsou izolovány pomocí teplovodivé folie, přes kterou je odváděno přebytečné teplo.



Obr.4.7 Technický výkres boxu – pohled shora. Jednotky: mm

Horní panel krytu obsahuje několik prvků, jež jsou propojeny s DPS uloženou pod nimi. Zcela vpravo nalezneme LCD displej. Připojení displeje k regulátoru je realizováno pomocí dutinkové lišty, do které se zasouvají oboustranné kolíky připájené k pinům displeje. Lišta i kolíky mají shodnou rozteč 2,54mm, která odpovídá rozteči pinů displeje. Zatímco DPS je uložena ve spodním dílu boxu, displej je zasazen do horní části. Délka kolíků musela být přizpůsobena rozměrům krabice, aby při jejím zkompletování došlo k přesnému zapojení konektoru.

Vlevo od displeje se v jedné řadě nad sebou nachází tři tlačítka. Samotné spínače se nachází přímo na DPS. Hlavní výhodou tohoto řešení je menší náchylnost k zarušení, díky zkrácení přívodních cest a absenci připojovacích vodičů. Další přednost pak spočívá ve snadné a přesné montáži. Aby bylo možné tlačítka obsluhovat na vrchním panelu krytu, bylo třeba vyrobit prodloužené hmatníky. Ty byly vyrobeny z hliníkové kulatiny o průměru 8mm. Jejich výroba probíhala kusově na stolním soustruhu, následné leštění na brusce pomocí hadrového kotouče. Zcela vlevo se nachází šest otvorů, jejichž umístění přesně odpovídá pozicím jednotlivých šroubů příslušných svorkovnic, umístěných na DPS. Otvory jsou určeny pro zasunutí odpovídajícího plochého šroubováku a úpravě dotažení dané svorkovnice.

Na levém čele boxu najdeme taktéž šest otvorů. Tyto jsou určeny pro připojení vodičů ke svorkovnicím. Je zde vstup pro fotovoltaický panel, výstup pro baterii a odpojitelný výstup pro připojení zátěže. Na zadní straně boxu se nachází otvor umožňující přístup k potenciometru, pomocí kterého je možné nastavit kontrast displeje. Potenciometr je v tomto případě zapojen jako proměnný dělič napětí, kterým se mění hodnota napětí na pinu displeje V_0 . Ladění je možné pomocí křížového mikrošroubováku.

Na horní a boční panel regulátoru bylo třeba doplnit popisky tlačítek a polarity svorkovnic. Tlačítka UP a DOWN jsou označena šipkami nahoru a dolů. Tlačítko pro přepínání menu je označeno písmenem M. Svorkovnice jsou označeny příslušnými symboly podle jejich účelu. Zleva doprava to je solární panel, zátěž a akumulátor. Jednotlivé vstupy mají označeny polarity znaménky + a -. Popisky byly vytvořeny v grafickém editoru Gimp složením z volně dostupných motivů a ikon. Pomocí laserové tiskárny byly vytištěny na transparentní folii a nalepeny pomocí průhledné lepicí pásky.



Obr.4.8 Popisky svorkovnic na předním panelu a tlačítek na bočním panelu

4.4 Software

Nový mikrokontrolér dodaný z výroby nemá předprogramovány žádné funkce, jeví se proto jako zcela pasivní součástka. Jeho chování je zcela v režii vývojáře, který pro něj nejprve musí vytvořit soubor instrukcí s danou posloupností, kterými se kontrolér následně řídí.

Program je možné psát v různých programovacích jazycích. Větší oblibu dnes mají tzv. vysokoúrovňové programovací jazyky jako například C,C++ nebo Java. Hotový program je pak třeba převést pomocí speciálního softwaru, tzv. kompiléru, do strojového kódu. Tento převod však nikdy není zcela optimální, obzvláště u vyšších jazyků. Úroveň optimalizace je závislá na použitém kompiléru a také na jeho licenci. Bezplatné licence obvykle optimalizují špatně, zatímco u placených s rostoucí cenou roste kvalita. Optimalizace má vliv kromě chodu programu také na velikost programu a tedy využití paměti kontroléru. Zejména nižší řady mikrokontrolérů PIC disponují velmi omezenou kapacitou paměti. Pokud nemáme v plánu připojit externí paměť, není vhodné užití vyšších jazyků. Jakýkoli větší program by se nám zkrátka do čipu nevešel.

Vhodnou alternativou je v našem případě použití nízkoúrovňového jazyka. Jednoduché čipy od Microchipu jsou zkrátka předurčeny k použití JSA – jazyka symbolických adres. Ten má velmi blízko ke strojovému kódu. Obecně bývá často označován jako assembler, což není tak úplně správně. Slovo assembler v angličtině totiž označuje pouze program, který překládá data do strojového kódu. Jazyk samotný pak nese označení assembly language.

Programování je prováděno pomocí instrukční sady, která se mírně liší pro každou procesorovou řadu. Tím se program stává prakticky nepřenositelným na jiné. Příkazy se týkají elementárních funkcí procesoru.

4.4.1 Hlavní program

Program je koncipován tak, aby po připojení napájení automaticky uvedl zařízení do provozu bez nutnosti dalšího nastavení. Po připojení baterie k regulátoru nejprve dojde k prvotní inicializaci mikrokontroléru. Inicializace v prvé řadě zajišťuje naplnění všech potřebných registrů, nezbytných pro další funkci programu. Jedná se například o volbu typu a frekvence oscilátoru a nastavení jednotlivých vstupně/výstupních portů, nastavení AD převodníku, ECCP modulu, nebo Timerů. Dále to je zavedení všech konstant a proměnných.

Poté dokončení inicializace MCU dochází k inicializaci LCD displeje. Ta je prováděna sérií příkazů vyslaných kontrolérem. U displeje je třeba nastavit typ komunikace, tedy zda se bude jednat o čtyřbitovou, případně osmibitovou komunikaci. Dále nastavujeme počet řádků, zobrazení, umístění a směr pohybu kurzoru apod.

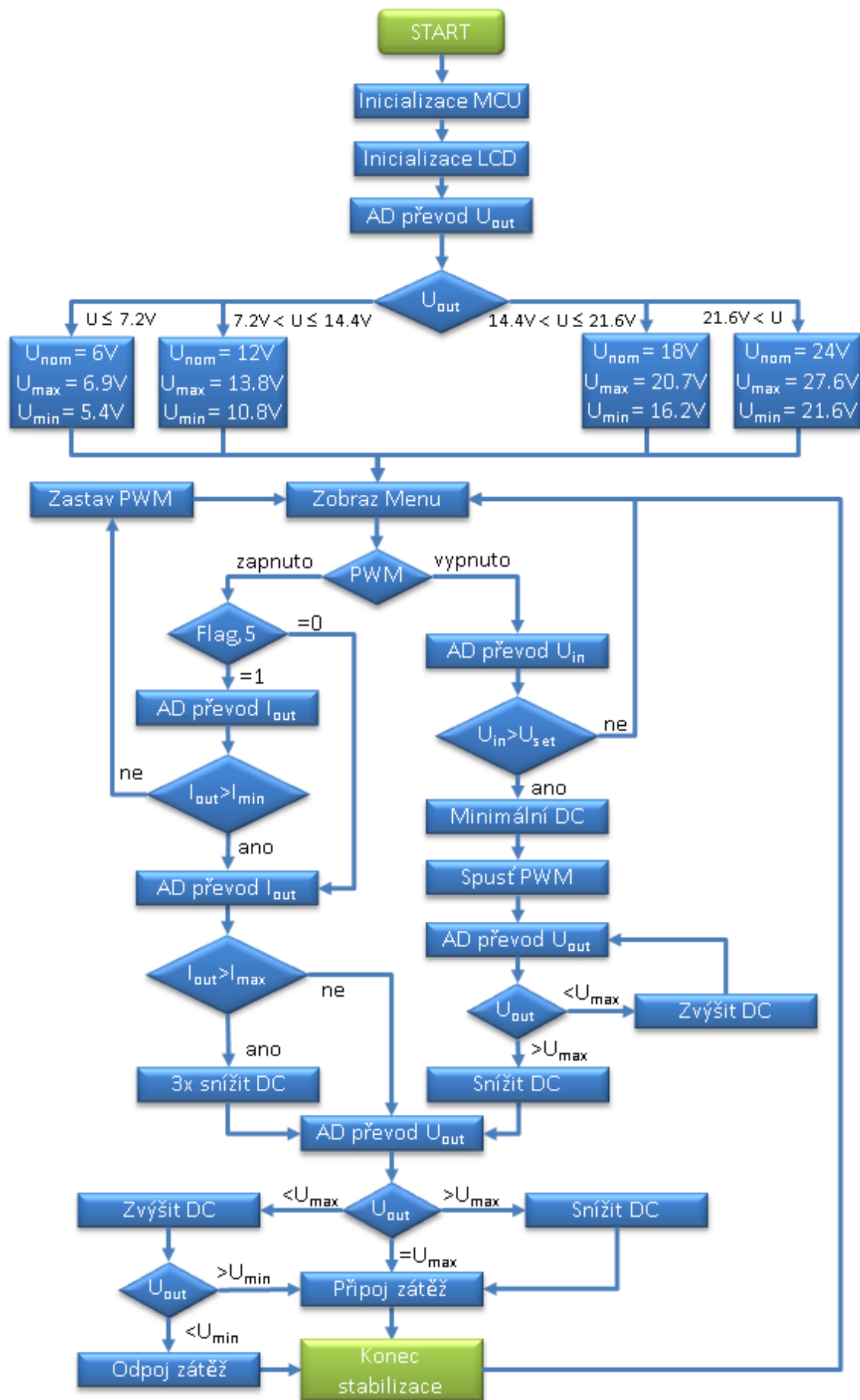
Následujícím krokem je automatická detekce připojené baterie. Regulátor proměří napětí baterie a podle výsledku rozhodne, zda je připojena 6, 12, 18, nebo 24 voltová baterie. Pro jiná napětí není regulátor naprogramován, ovšem v případě potřeby postačí jednoduchý softwarový upgrade. Podle zvolené baterie je nastavena maximální a minimální hodnota výstupního napětí. Program počítá s parametry klasického olověného akumulátoru, neboť výhradně s ním bylo zařízení testováno. Díky řízení mikroprocesorem je opět možné softwarově přidat jiné typy baterií s odlišnými nabíjecími parametry.

Po zvolení baterie je na displeji zobrazena první nabídka menu. Od této chvíle je aktivní tlačítko MODE, které slouží k přepínání nabídek menu na displeji. Ty se každým stiskem opakují ve smyčce. U některých nabídek jsou navíc aktivní i tlačítka UP a DOWN. Ta umožňují nastavení výstupního proudu a dále v menu umožňujícím kalibraci vstupního a výstupního napětí.

Nyní program cyklicky pracuje až do případného odpojení napájení. Přepínáním jednotlivých nabídek můžeme měřit obvodové veličiny a případně upravovat základní nastavení regulátoru. Dosud však nebyl spuštěn modul ECCP, který je nastaven na funkci PWM. Program neustále vyhodnocuje napětí na vstupu, čímž je schopen detekovat připojení fotovoltaického panelu. Pokud není připojen, nebo nedodává dostatečné napětí, zůstává funkce PWM deaktivována. Teprve až s nárůstem napětí na vstupu nad stanovenou mez dojde k aktivaci spínacího zdroje. Funkce PWM je spuštěna a regulátor začíná stabilizovat výstupní napětí. Vstup zůstává opakovaně proměřován a při poklesu napětí pod danou hodnotu je funkce spínacího zdroje opět vypnuta. Regulátor čeká do té doby, dokud napětí opět nevzroste.

Během provozu jsou měřeny dvě hodnoty proudů, vstupní a výstupní. Měření vstupního proudu ve stávajícím programu slouží pouze k informaci a výpočtu vstupního výkonu. Při rozšíření by mohlo sloužit k funkci MPPT, která byla popsána v teoretické části. Během provozu spínacího zdroje je periodicky sledována hodnota výstupního proudu. Nastavení maxima výstupního proudu totiž ovlivňuje spínací cyklus PWM. Při překročení zvolené úrovně je jednorázově upravena střída spínání až do doby, kdy se proud vrátí do požadovaných mezí. V menu je možné nastavit hodnotu maximálního výstupního proudu od 1 do 10 A s krokem 100 mA.

Na výstup regulátoru lze připojit paralelně s baterií externí zátěž pracující s napětím odpovídajícím napětí baterie. Aby nedošlo k vybití baterie pod konečné vybíjecí napětí, je tento výstup automaticky odpojen při poklesu napětí pod tuto hranici. Výstup je znovu připojen až po dosažení napětí baterie.



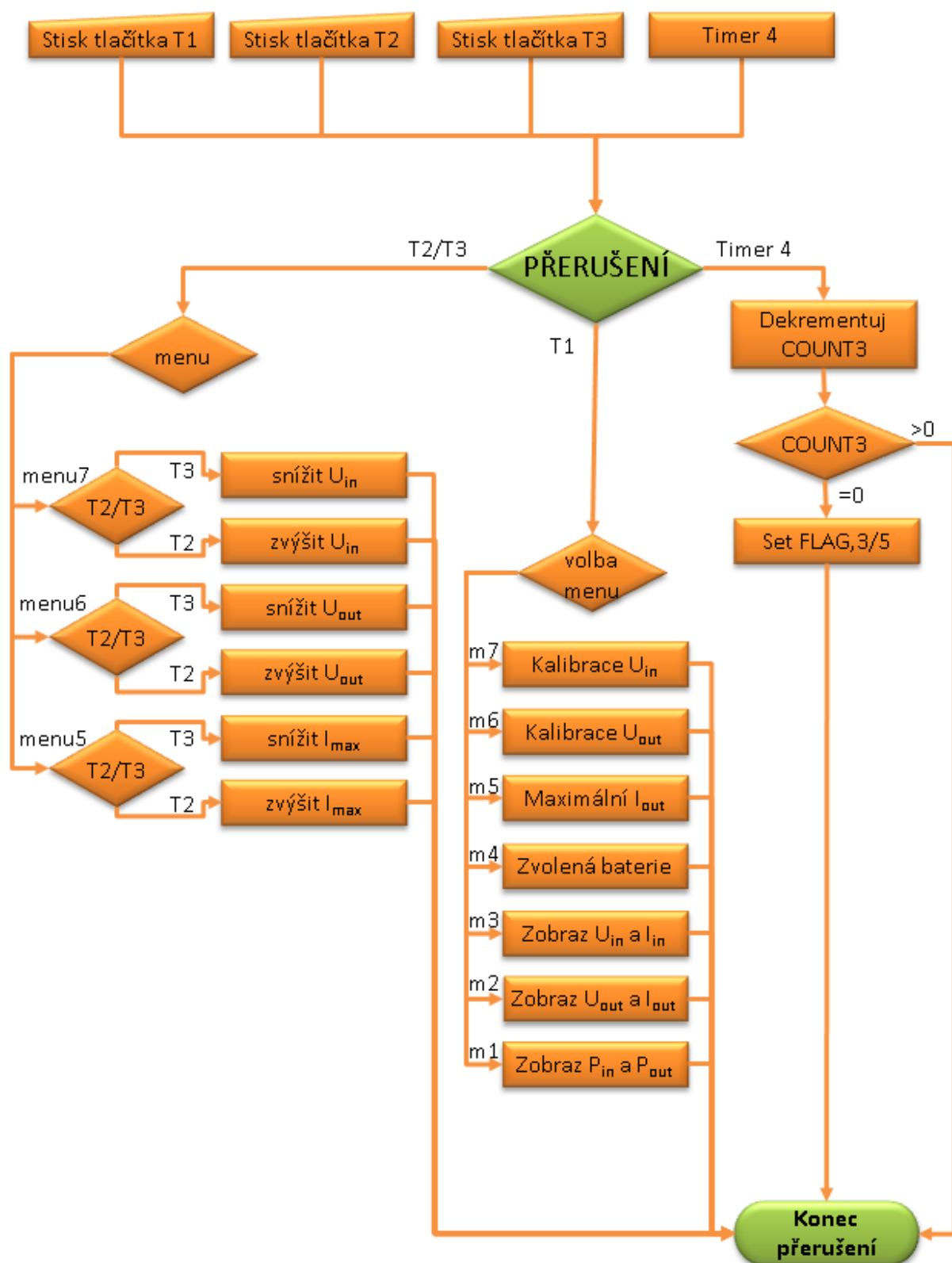
Obr.4.9 Vývojový diagram hlavní části programu

4.4.2 Rutina přerušení ISR

Program využívá funkce přerušení při detekci stisku tlačítek a při přetečení čítačů. Tlačítka jsou pomocí interních pull-up rezistorů připojena k napájecímu napětí. Stiskem dojde k uzemnění daného pinu a tedy změně logické úrovně z 1 na 0. Tato změna je detekována a v případě povolení vyvolá tzv. interrupt on change, tedy přerušení při změně. Ne vždy je však žádoucí, aby byla provedena reakce na stisknuté tlačítko. Před proběhnutím počátečních inicializací jsou všechna tlačítka deaktivována. Následně je zaktivováno tlačítko MODE pro pohyb mezi nabídkami menu. Zbylá dvě tlačítka jsou však aktivní pouze v případě nabídek, kde je možnost měnit hodnoty.

Protože na tlačítka může působit rušení, které je obzvláště v případě spínaného zdroje značné, je třeba ošetřit případy falešných sepnutí. Při detekci změny je kvůli zpoždění spuštěn Timer 6 a po každém jeho přetečení dojde k testování stisku tlačítka. Pokud je třikrát po sobě vyhodnocena logická nula, teprve poté je tlačítko uznáno za skutečně stisknuté. Poté následuje provedení úkonu, který je s daným tlačítkem spojen. Po jeho dokončení je třeba opět testovat uvolnění tlačítka, které probíhá stejným způsobem jako testování stisku. Při uvolnění tlačítka totiž vznikají zákmity, které by mohly vést k opakované detekci stisku. Dokud tedy není tlačítko uznané za uvolněné, nemůže dojít k novému vyhodnocení stisku. Tato rutina pracuje velmi dobře a tlačítka díky ní pracují zcela bezchybně.

Pro přerušení je využíván dále časovač Timer 4. Ten slouží k prodlevě mezi aktualizací menu. Program se standardně zabývá stabilizací, která musí probíhat v reálném čase a přibližně každou vteřinu je přerušením přesměrován na aktualizaci menu. Ta probíhá v závislosti na právě zvolené položce proměření konkrétních obvodových veličin a zobrazením na displeji.



Obr.4.10 Rozhodovací diagram pro přerušeni

4.4.3 Metody

Pro přehlednost a usnadnění programování je program složen z funkcí, tzv. metod. Jednotlivé metody jsou od sebe rozlišeny návěstím, které se nachází na jejich začátku. Návěstí odkazuje na danou adresu v paměti, kam je program přesměrován při zavolání metody. Metoda může zahrnovat návratovou instrukci RETURN, která nás vrací na místo, z kterého byla metoda volána.

Pro funkci regulátoru bylo třeba vytvořit řadu metod. Jednou skupinou je sada matematických operací. Instrukční sada použitého mikrokontroléru umožňuje pouze elementární aritmetické výpočty, jako je sčítání a odčítání. Rotací registru je zase možné jeho obsah násobit či dělit mocninou čísla dvě. Například trojnásobnou rotací vlevo docílíme násobení osmi, tedy 2^3 . S 8bitovými registry jsme omezeni na maximální číslo 255 v desítkové soustavě. Pro složitější výpočty to bylo pochopitelně nedostatečné. Bylo proto třeba navrhnout metody kombinující více registrů, díky čemuž je program schopen počítat s 16bitovými, případně 32bitovými čísly. Složitější výpočty byly zapotřebí především kvůli LCD displeji. Pro ten je třeba hodnoty registrů, které jsou v dvojkové soustavě, převést do soustavy desítkové. Například pro zobrazení měřených napětí bylo třeba obsah registrů AD převodu násobit konstantou odpovídající dělicímu poměru napěťového děliče. Tím byly dále zvýšeny nároky na potřebný číselný rozsah. Metoda pro násobení je proto 32bitová, číslo je tedy rozděleno do čtyř registrů.

Další sada metod slouží k ovládní displeje. Za zmínku stojí například čtyřbitové vysílání osmibitových příkazů. Vysílaná 8bitová instrukce je rozdělena na horní a spodní půlbyte, tzv. nibble. Displej přijímá jednotlivé části postupně a instrukci zpracuje až po získání celého bytu. Výhodou tohoto způsobu je menší počet pinů MCU, které musíme rezervovat pro displej. Nevýhodou je možnost zanesení chyby při narušení datového přenosu. Pokud displej nepřijme v pořádku celý byte, ale například jen první polovinu, jako druhou polovinu bere další správně přijatý půlbyte. Ten však poté chybí v další instrukci a tím nastává řetězová reakce, kdy displej přestane správně zobrazovat zasláná data. Při zápisu na daný port kontroléru je třeba maskovat všechny bity, které neslouží k přenosu dat pro displej. Tím je zamezeno nežádoucím změnám na pinech zastávajících jinou funkci.

Pro zobrazování předem definovaných řetězců znaků, jakými jsou slova či věty, slouží metoda pracující s tabulkou znaků. Napsaný řetězec je rozložen na jednotlivé znaky, které jsou postupně vysílány na displej a jeden po druhém zobrazovány.

4.4.4 Makra

Makra jsou alternativou metod, která se více přibližuje vyšším programovacím jazykům. Hlavní výhodou je možnost přiřazení parametrů, se kterými makro pracuje. Parametry se nejčastěji rozumí registry, se kterými je následně pracováno jako s proměnnými. Volání makra včetně volby parametrů nám zabere pouze jeden řádek kódu, což výrazně přispívá ke zpřehlednění programu. Při každém volání makra je celý jeho kód překopírován do zdrojového kódu. Program obsahující hodně maker je proto náročný na programovou paměť. Oproti tomu při volání metody pouze skočíme na místo v paměti a nedochází k duplikaci kódu. Další nevýhodou maker je nemožnost přímého debugování. To znamená, že není možné přímo v kódu krokovat jednotlivé skoky v makru, jak je to umožněno u metod. Jedinou možností je zobrazení tzv. „disassembly listing,“ kde můžeme sledovat skoky mezi adresami paměti. Z těchto důvodů se makra osvědčila spíše pro jednodušší operace, jako je třeba naplnění registrů apod. Následně pro samotnou práci s registry jsou již použity metody. Níže je uveden příklad makra sloužícího k naplnění registrů pro matematické operace.

```
MATH      MACRO      NUM1HI,NUM1LO,NUM2HI,NUM2LO
MOVF      NUM1HI,W
MOVWF     MATH1
MOVF      NUM1LO,W
MOVWF     MATH2
MOVF      NUM2HI,W
MOVWF     MATH3
MOVF      NUM2LO,W
MOVWF     MATH4
ENDM
```

4.4.5 Komentáře

Důležitou součástí programu jsou komentáře. Každý komentář začíná středníkem (;) a končí na daném řádku bez koncového znaku. Překladač tuto část přehlídí a do strojového kódu komentáře nepřevádí. Na funkci programu nemají žádný vliv. Jejich přínos je tedy výhradně pro programátora a spočívá v zpřehlednění kódu, k rychlejší orientaci a pochopení.

Funkci komentáře mohou částečně zastávat vhodně zvolená návěští metod a maker. Pro upřesnění však obvykle bývá vhodné přidat alespoň krátký komentář popisující funkci metody. Během programování se skutečně osvědčilo komentáři nešetřit. U složitějších metod je okomentována většina řádků a program je tak mnohem přehlednější.

STAB

BANKSEL CCP2CON

BTFSC CCP2CON,3 ; Je PWM aktivni?

GOTO STAB2 ; Je aktivni

CALL UIN ; Neni aktivni, zmer vstupni napeti

COMP STABHI,STABLO,MQ2,MQ1 ; Porovnej vstup s nastavenym vystupem (maximalni mozne napeti baterie)

BTFSS STATUS,C

GOTO STABOK ; Vstup je nedostatecne napajen, PWM zustava vypnute

V případě využití jednotlivých bitů registru jako tzv. flagů, je žádoucí vypsát, čeho se který bit týká a jaká hodnota co představuje.

FLAGS ; 0 - BIGNUM, 1 - DC, 2 - Zmena menu, 3 - Int pro Timer6, 4 - volba UP/DOWN, 5 - MODE nebo UP/DOWN, 6 - Provedeno po stisku, 7 - Zmena UP/DOWN

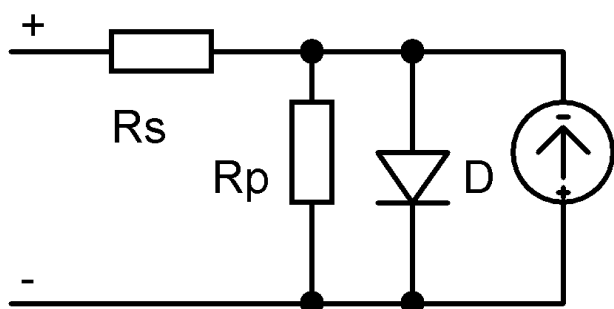
FLAG ; 0 - Zobrazeni vykonu(1) /napeti,proud(0), 1 - smer lin(znamenko), 2 - smer lout(znamenko), 3 - COUNTER3 pretek, 4 - Zaloha DC, 5 - Restart PWM

4.5 Simulace

Cílem simulací bylo především ověřit správnost navrženého zapojení před samotnou realizací testovací DPS. Z důvodu digitálního řízení kontrolérem nebylo možné kompletně odsimulovat celý obvod se všemi jeho funkcemi. Simulována proto byla pouze analogová část představující spínaný zdroj. Modely většiny součástek pro simulační program PSPICE jsou volně dostupné ke stažení na webových stránkách jednotlivých výrobců. V případě nedostupného modelu byla součástka nahrazena adekvátním modelem od jiného výrobce.

4.5.1 Náhradní obvody

Pro simulaci FV panelu bylo použito zjednodušené náhradní schéma fotovoltaického článku sestavené z elementárních součástek. Simulovaný panel je složen ze 72 sériově zapojených článků. Výkon panelu činí přibližně 70W.



Obr.4.11 Zjednodušené náhradní schéma fotovoltaického článku

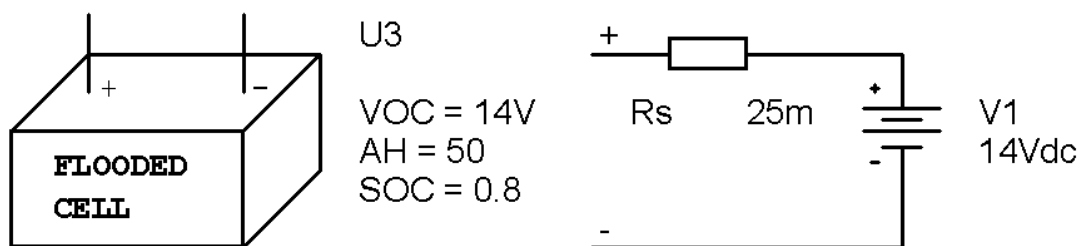
Pro ideální článek platí, že sériový odpor R_s je nulový a paralelní R_p se blíží nekonečnu. Proudový zdroj představuje proud nakrátko I_{SC} daného článku. Napětí článku je dáno rovnicí

$$V_{PV\ cell} = V_D - R_s I_{PV}$$

Pro nenulový sériový odpor proto s rostoucím proudovým zatížením klesá napětí článku. Paralelní odpor se projeví na výstupním proudu podle rovnice

$$I_{SC} - I_D - \frac{V_D}{R_p} - I_{PV} = 0$$

Simulace baterie byla poměrně komplikovanou záležitostí. Novější verze OrCADu již obsahuje model olověného akumulátoru. V použité verzi byl k dispozici pouze plovoucí článek, který mohl funkci baterie zastat. Volitelnými parametry modelu je napětí naprázdno (V), kapacita (Ah) a stav nabití (%).

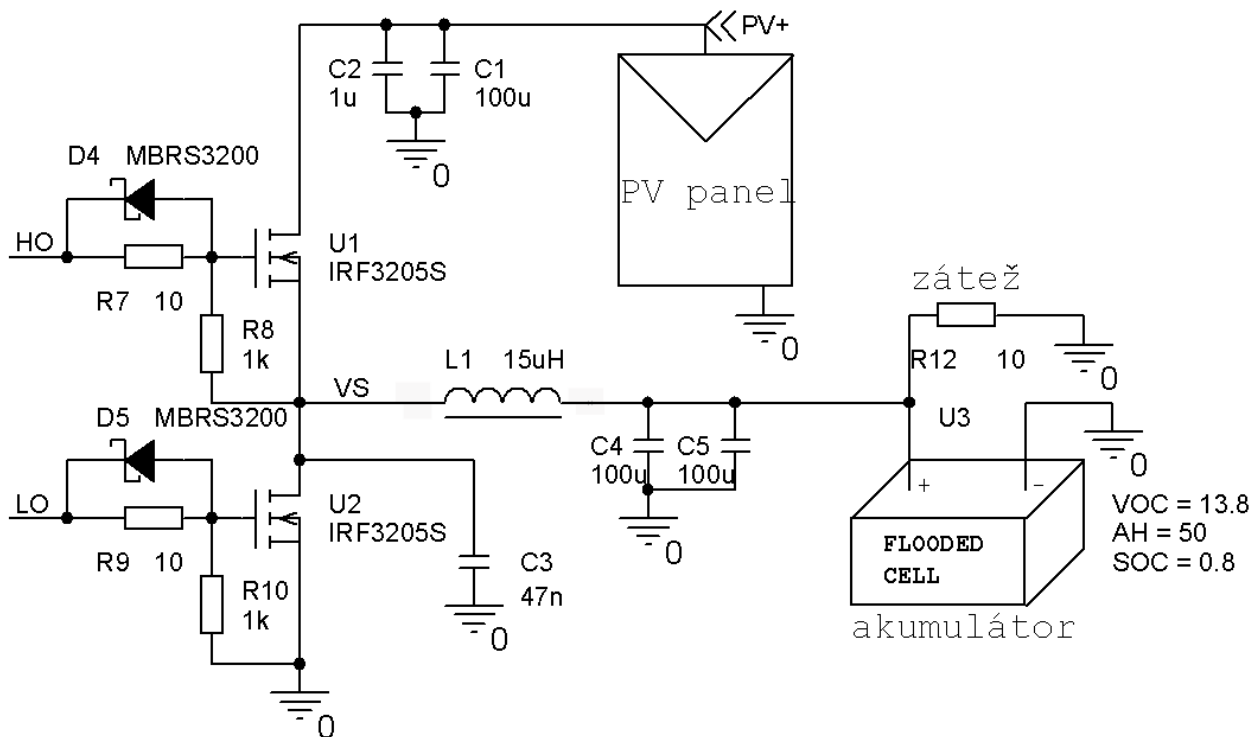


Obr.4.12 Model plovoucího článku a ekvivalentní model baterie [PSpice]

Během spuštění simulace však docházelo k problémům, které se ne vždy podařilo vyřešit. Nejčastější hlášenou chybou byl malý rozdíl napětí $V_{on} - V_{off}$ interního spínače. Obvykle pomohlo snížení přesnosti simulace. V některých případech však nebylo možné simulaci s tímto prvkem spustit. Jako zjednodušená náhrada posloužilo zapojení ideálního zdroje napětí se sériovým odporem.

Pro simulaci driveru IR2110S se podařilo od výrobce International Rectifier získat model pro PSpice. Bohužel i u něj se objevovaly časté problémy, kvůli kterým nemohl být použit u všech simulací. Častou chybou bylo přetečení hodnot. Po delším hledání řešení byl problém částečně vyřešen snížením napětí baterie na 5V. Podařilo se však ověřit správnou funkci použitého zapojení. V dalších simulacích za něj tvořila náhradu dvojice pulzních zdrojů napětí, z nichž jeden musel být plovoucí, stejně jako je tomu u high-low side driveru.

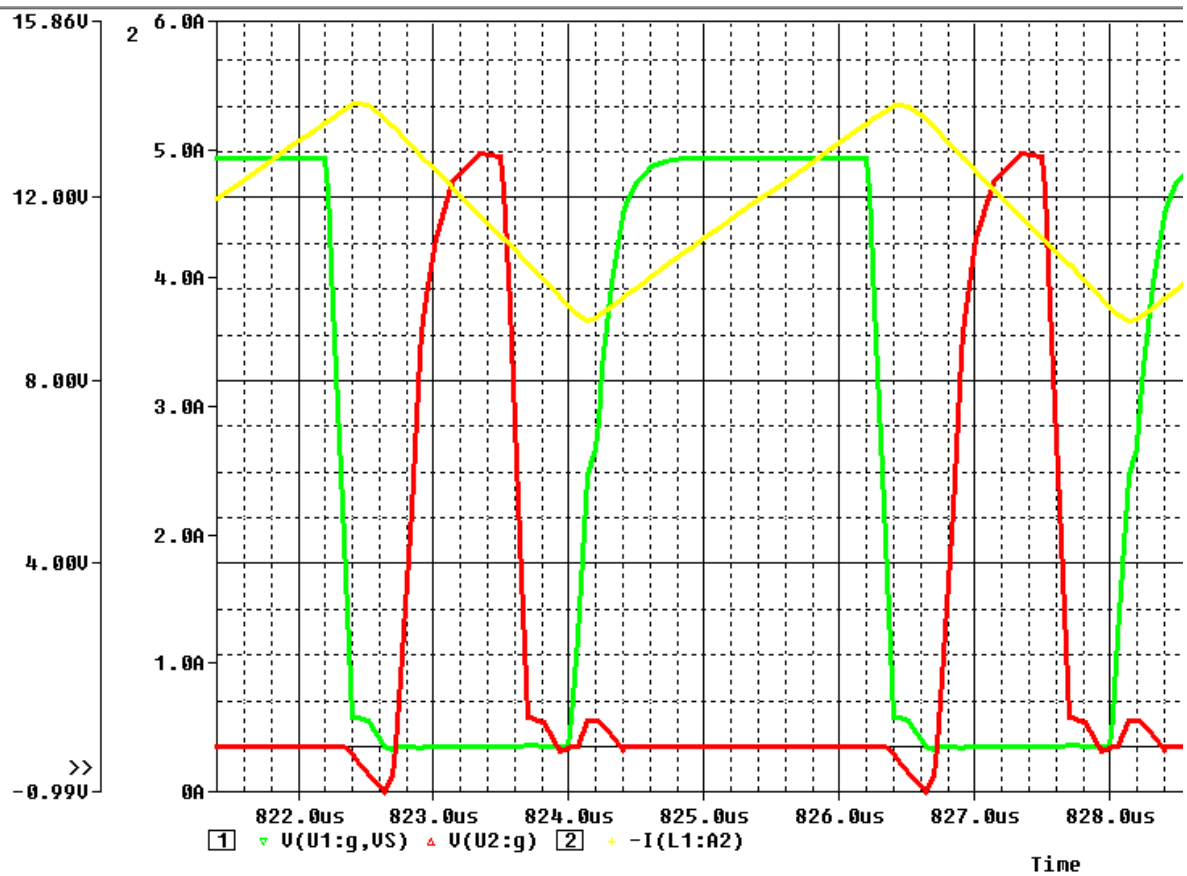
Buzení driveru, které má reálně na starost mikrokontrolér, bylo třeba pro simulaci také vhodně nahradit. Místo dvou synchronních PWM výstupů byly použity dva pulzní zdroje napětí, které bylo třeba vhodně nastavit. Napěťové úrovně odpovídají logickým úrovním kontroléru 5V a 0V. Doba jedné periody spínání je 4 us, což odpovídá frekvenci 250 kHz. Pomocí zpoždění jednoho zdroje byla nasimulována funkce spínání polomostu včetně deadtime zóny. Pro reálnější průběhy byla nastavena i doba náběžné (Rise Time) a sestupné hrany (Fall Time) na hodnotu 200 ns.



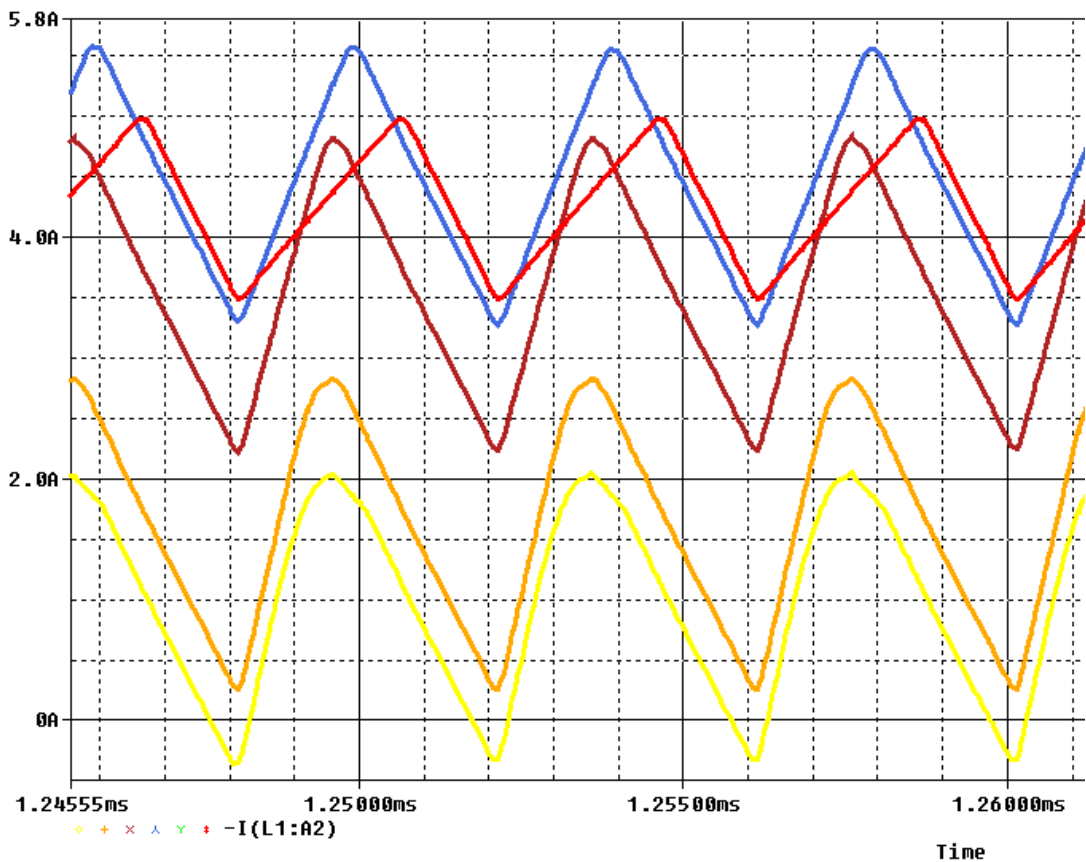
Obr.4.13 Schéma simulovaného obvodu

4.5.2 Transientní analýza

Pro otestování obvodu byla vzhledem k jeho povaze podstatná především transientní analýza, která pracuje v časové oblasti. Po překonání počátečního neustáleného stavu se obvod dostává do periodického pseudoustáleného stavu. V simulacích se sice dostaneme do ustáleného stavu, ovšem jen proto, že sem nebyla zakomponována funkce stabilizace proudu. Ta se v reálném obvodu projevuje neustálým kolísáním střídá.



Obr.4.14 Průběh proudu cívkou v závislosti na spínání tranzistorů [Pspice]



$t_{on}=0.2\text{ us}$ | $t_{on}=0.6\text{ us}$ | $t_{on}=1.0\text{ us}$ | $t_{on}=1.4\text{ us}$ | $t_{on}=2.2\text{ us}$

Obr.4.15 Průběh proudu cívkou v závislosti na době otevření High-tranzistoru [Pspice]

4.6 Technické parametry

Rozměry (d x š x v)	110 x 52 x 43 mm
Hmotnost	202 g
Průřez kabelu	1.5 mm ²
Připojení akumulátoru	6 / 12 / 18 / 24 V
Typ akumulátoru	olověný
Klidová spotřeba	20 mA
Nabíjecí proud (max.)	10 A
Proud modulu (max.)	5 A
Výkon modulu (max.)	200 Wp
Vstupní napětí (max.)	40 V
Koncové nabíjecí napětí	2,3 V / článek
Koncové vybíjecí napětí	1,8 V / článek
Teplotní rozsah	0 až 50 °C

5 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce byl nejenom návrh a pochopení problematiky solárního regulátoru. Bylo jím zároveň hlubší prostudování témat týkajících se oborů jako fotovoltaika, akumulátory, spínané zdroje nebo programovatelné obvody. Přes důkladné teoretické nastudování dané problematiky však praxe vždy dokáže něčím překvapit. Protože celý vývoj probíhal ruku v ruce s testováním na vývojových DPS, bylo možné průběžně odhalovat nedostatky návrhu a směřovat ho správným směrem. Velká část práce spočívala v odladění softwaru na reálném obvodu. Na jednu stranu bylo odhalování chyb mnohdy náročné, ovšem na druhou stranu jsem díky němu mohl daleko lépe pochopit celou problematiku navrhovaného zařízení. Zajímavé bylo především porovnání teoretických předpokladů s chováním reálných součástek v obvodu.

Návrh počítá s možností dalšího vývoje a případně i alternativního využití. Obvod s programovatelným mikrokontrolérem má oproti analogovým obvodům podstatnou výhodu, kterou je flexibilita. Úpravou programu je možné dodatečně přidat nové funkce a tím pozměnit činnost obvodu. Zařízení je možno využít jako zvyšující nebo snižující regulátor. Vstupním zdrojem napětí nemusí být nutně fotovoltaický panel, ale prakticky jakýkoli zdroj stejnosměrného napětí. Protože je obvod schopen obousměrného přenosu výkonu, může pracovat například jako záložní zdroj s baterií.

V návaznosti na bakalářskou práci Sledovač slunce tak vznikl kompletní návrh solárního regulátoru nabíjení, zahrnující elektrické schéma, podklady pro výrobu DPS, konstrukční řešení i programové vybavení mikrokontroléru. Navržené zařízení se podařilo částečně odsimulovat a realizovat v podobě plně funkčního prototypu. Cílem do budoucna je zlepšení algoritmu stabilizace a přidání funkce MPPT pomocí upgradu programu.

6 Použité prameny a literatura

- [1] Soukup, J.: Sledovač slunce, bakalářská práce, ČVUT v Praze, FEL 2011
- [2] Vobecký J., Záhlava V.: Elektronika – součástky a obvody, principy a příklady, Třetí rozšířené vydání, Grada Publishing, Praha 2005
- [3] Záhlava, V. : Návrh a konstrukce desek plošných spojů, BEN, Praha 2011
- [4] Katalogové a aplikační listy příslušných elektronických součástek
- [5] ANDERSON, Peter H. PIC- Outputting Multiple Strings using Table Lookup. PHAnderson [online]. Baltimore, MD, 1998 [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: http://www.phanderson.com/PIC/16C84/mult_string.html
- [6] PICPROJECTS. PIC Assembler Tips [online]. 2013 [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: <http://picprojects.org.uk/projects/pictips.htm>
- [7] MAHER, Fred. Simple bike computer tutorial. PIClist: Microchip PIC [online]. [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: <http://www.piclist.com/techref/piclist/biketut/index.htm>
- [8] Using 10 bit ADC in 8 bit MCU. MICROCHIP. *Microchip Forum* [online]. 2008 [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: <http://www.microchip.com/forums/m367217-print.aspx>
- [9] Lcd display. ROMUX.COM. Romux: pic-tutorial [online]. [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: <http://www.romux.com/tutorials/pic-tutorial/lcd-display>
- [10] GOODWIN, Nigel. PIC Tutorial Three: LCD Modules. *WinPicProg 1.91* [online]. [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: http://www.winpicprog.co.uk/pic_tutorial3.htm
- [11] ADC voltage to LCD. MICROCHIP. *Microchip Forum* [online]. 2008 [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: <http://www.microchip.com/forums/m650458-print.aspx>

- [12] Chapter 3: I/O Ports. MIKROELEKTRONIKA. *MikroElektronika: Development tools, Compilers, Books* [online]. [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: <http://www.mikroe.com/chapters/view/4/chapter-3-i-o-ports/>
- [13] Znakové LCD displeje. DOVEDA BOYS. *Doveda.byl.cz* [online]. 2007 [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: <http://doveda.byl.cz/lcd/>
- [14] VAUCOURT, Christophe. TEXAS INSTRUMENTS. *Choosing Inductors and Capacitors for DC/DC Converters*. Dallas, Texas, February 2004, 6 s. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva157/slva157.pdf>
- [15] WEST VIRGINIA UNIVERSITY. *PIC Assembly Language and Instruction set*. 49 s. Dostupné z: http://www.csee.wvu.edu/classes/cpe312/presentations/PDF/PIC_Part3_AssemblyLanguage.pdf
- [16] MARTIN, Alan, Marc DAVIS-MARSH, Giuseppe PINTO a Ismail JORIO. KEMET. *CAPACITOR SELECTION FOR DC/DC CONVERTERS: WHAT YOU NEED TO KNOW TO PREVENT EARLY FAILURES, AND REDUCE SWITCHING NOISE*. 2012. Dostupné z: [http://www.kemet.com/kemet/web/homepage/kfbk3.nsf/vaFeedbackFAQ/BEC706CDDF53DFC785257B4800579637/\\$file/Avnet2012PowerForum_CapacitorsSelection.pdf](http://www.kemet.com/kemet/web/homepage/kfbk3.nsf/vaFeedbackFAQ/BEC706CDDF53DFC785257B4800579637/$file/Avnet2012PowerForum_CapacitorsSelection.pdf)
- [17] DOSKOČIL, Josef. Sulfatace olověných akumulátorů. *Karavan: Články* [online]. 2011 [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: http://www.caravan24.cz/articles.php?article_id=374
- [18] MAHBUB, Syed Tahmid. Using the high-low side driver IR2110: explanation and plenty of example circuits. *Tahmid's blog* [online]. 2013, January 20, 2013 [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: <http://tahmidmc.blogspot.cz/2013/01/using-high-low-side-driver-ir2110-with.html>
- [19] PIC Microcontroller Comparison Math Methods. *PIClist*. Microchip PIC [online]. [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: <http://www.piclist.com/techref/microchip/comcon.htm>
- [20] A Guide to Debouncing: How to Debounce a Contact in Two Easy Pages. THE GANSSLE GROUP. *Embedded Systems Home Page* [online]. 2004, June, 2008 [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: <http://www.ganssle.com/debouncing.pdf>

- [21] PCB Trace Width Calculator. *The CircuitCalculator.com Blog: a blog with live web calculators* [online]. 2006 [cit. 2013-12-07]. Dostupné z:
<http://circuitcalculator.com/wordpress/2006/01/31/pcb-trace-width-calculator/>
- [22] POOL servis: princip výroby. PRAGOBOARD S.R.O. *PragoBoard: vícevrstvé, dvou a jednovrstvé plošné spoje* [online]. 2012 [cit. 2013-12-07]. Dostupné z:
http://www.pragoboard.cz/pool_servis
- [23] DŘÍNOVSKÝ, Jiří, Tomáš FRÝZA, Jiří SVAČINA, Zdeněk KEJÍK a Václav RŮŽEK. ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY. *Encyklopedie EMC: Elektromagnetická kompatibilita* [online]. [cit. 2013-12-07]. Dostupné z:
<http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=encyclopedia>
- [24] JARVIS, Tim. Enclosure Design for EMC. RADIOCAD. [online]. [cit. 2013-12-07]. Dostupné z: http://www.radiocad.co.uk/_downloads/EMCenclosure.pdf
- [25] IHLP® INDUCTOR LOSS CALCULATOR TOOL. VISHAY. *Vishay: manufacturer of discrete semiconductors and passive components* [online]. [cit. 2013-12-07]. Dostupné z:
<http://www.vishay.com/inductors/calculator/calculator/>
- [26] KREJČIŘÍK, Alexandr. Materiály předmětu X34NZE – Návrh napájecích zdrojů pro elektroniku [online]. [cit. 2013-12-07] Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/krejcirik/>
- [27] GRUETTER, Jeff. Solar Energy Harvesting. *Power Systems Design (PSD): Empowering Global Innovation* [online]. 2010 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z:
<http://www.powersystemsdesign.com/solar-energy-harvesting>
- [28] MAEHLUM, Mathias Aarre. Which Solar Panel Type is Best? Mono- vs. Polycrystalline vs. Thin Film. ENERGY INFORMATIVE. THE HOMEOWNER`S GUIDE TO SOLAR PANELS [online]. 2013, December 6, 2013 [cit. 2013-11-18]. Dostupné z:
<http://energyinformative.org/best-solar-panel-monocrystalline-polycrystalline-thin-film/>

7 Seznam použitých zkratek

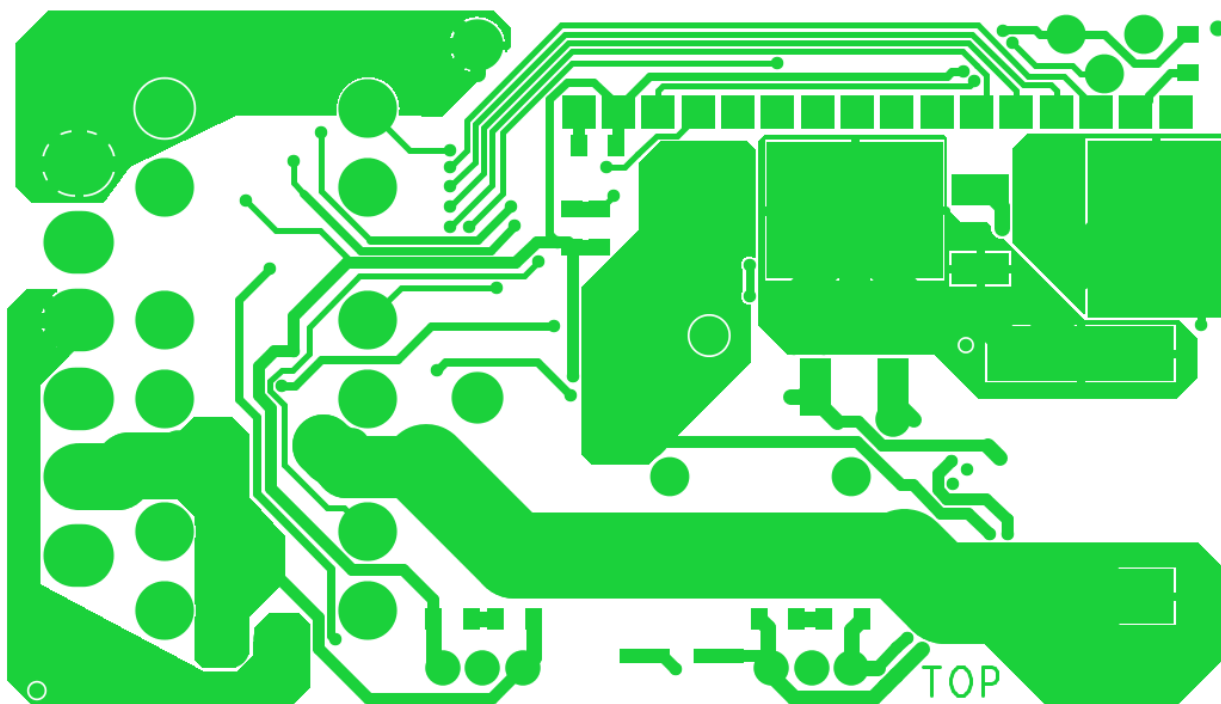
Zkratka	Anglický význam	Český význam
AH	Ampere Hour	ampérhodina
AD	Analog/Digital	analogově/digitální
AGM	Absorbed Glass Mat	absorpční skleněná rohož
DC	Direct Current	stejnoseměrný proud
DC	Duty Cycle	střída
DoD	Deep of Discharge	hloubka vybití
DPS		deska plošných spojů
EMC	Electromagnetic compatibility	elektromagnetická kompatibilita
ESD	Electrostatic discharge	elektrostatický výboj
EV	End-point Voltage	konečné vybíjecí napětí
ICSP	In Circuit Serial Programming	sériové programování v obvodu
ISR	Interrupt Service Routine	servisní rutina přerušování
JSA		jazyk symbolických adres
LCD	Liquid crystal display	display z tekutých krystalů
LED	Light emitting diode	svítivá dioda
MCU	Microcontroller unit	mikrokontrolér
MOSFET	Metal Oxide Field Effect Transistor	Polem řízený tranzistor
MPPT	Maximum power point tracking	sledování bodu maximálního výkonu
PCB	Printed circuit board	deska plošných spojů
PV / FV	Photovoltaic	fotovoltaický
PWM	Pulse-width modulation	pulsně-šířková modulace
SLI	Starting Lighting Ignition	startování svícení zapalování
SMD	Surface Mount Device	součástky pro povrchovou montáž
SOC	State of Charge	stav nabití
VA	Volt-ampere	volt-ampérová
VOC	Voltage Open Circuit	napětí naprázdno
VRLA	Valve-regulated Lead-Acid	ventilem řízená olověná baterie

8 Seznam obrázků a tabulek

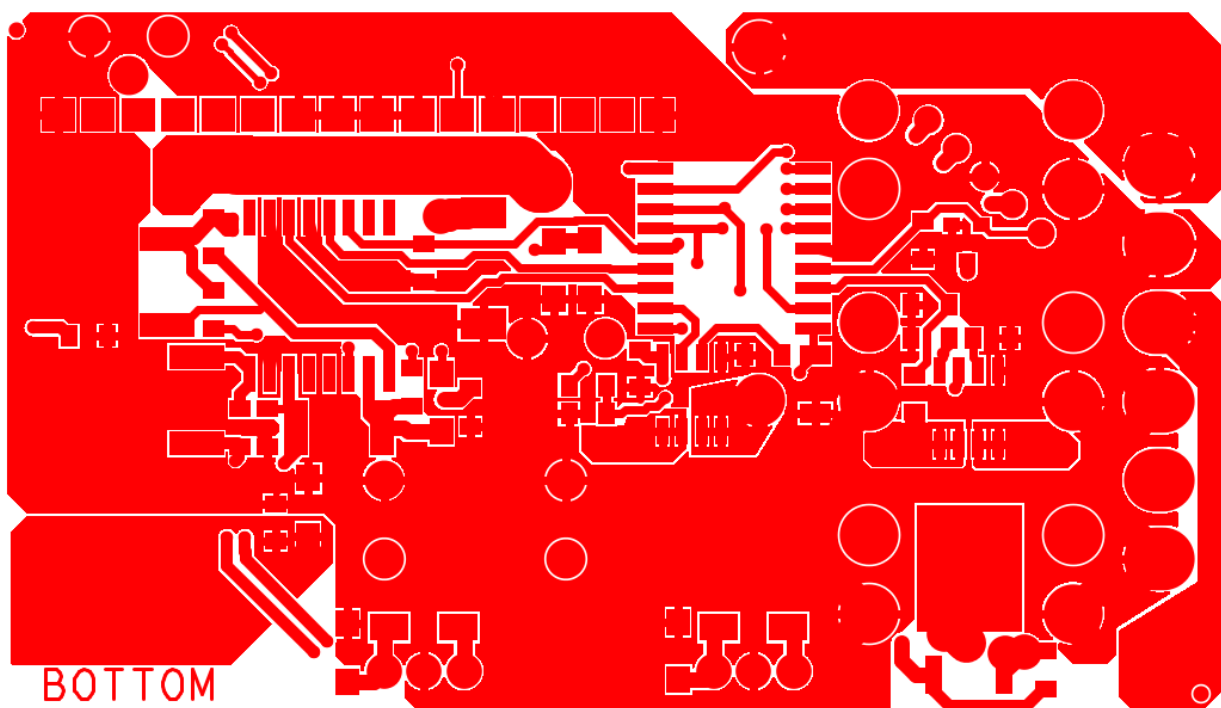
Obr.3.1	Polykrystalický a monokrystalický článek. Zdroj: http://cdn.siliconsolar.com/	15
Obr.3.2	Pružný tenkovrstvý článek. Zdroj: http://web.utk.edu/~opvwshop/	15
Obr.3.3	Zatěžovací charakteristika solárního článku [27]	17
Obr.3.4	Paměťový efekt způsobený přebíjením za zvýšené teploty.....	21
Obr.4.1	Pružný pogo pin. Zdroj: Ebay.com	23
Obr.4.2	Zapojení pinu MCLR.....	24
Obr.4.3	Zapojení driveru IR2110S.....	25
Obr.4.4	Kalkulátor ztrát cívky [25].....	27
Obr.4.5	Zapojení displeje	30
Obr.4.6	Blokové schéma ACS712.....	31
Obr.4.7	Technický výkres boxu – pohled shora. Jednotky: mm	36
Obr.4.8	Popisky svorkovnic na předním panelu a tlačítek na bočním panelu	37
Obr.4.9	Vývojový diagram hlavní části programu.....	40
Obr.4.10	Rozhodovací diagram pro přerušení.....	42
Obr.4.11	Zjednodušené náhradní schéma fotovoltaického článku.....	46
Obr.4.12	Model plovoucího článku a ekvivalentní model baterie [PSpice].....	47
Obr.4.13	Schéma simulovaného obvodu	48
Obr.4.14	Průběh proudu cívkou v závislosti na spínání tranzistorů [PSpice].....	49
Obr.4.15	Průběh proudu cívkou v závislosti na době otevření High-tranzistoru [PSpice].....	49
Obr.A1	Vrstva mědi TOP.....	57
Obr.A2	Vrstva mědi BOTTOM – zrcadlená	57
Obr.A3	Vrstva nepájkivé masky TOP	58
Obr.A4	Vrstva nepájkivé masky BOTTOM - zrcadlená.....	58
Obr.A5	Vrstva servisního potisku TOP	59
Obr.A6	Vrstva servisního potisku BOTTOM - zrcadlená.....	59
Obr.B1	Zjednodušené blokové schéma.....	60
Obr.B2	Kompletní elektrické schéma.....	61
Obr.C1	Foto osazené DPS, strana TOP.....	63
Obr.C2	Foto osazené DPS, strana BOTTOM.....	63
Obr.C3	Fotografie regulátoru s připojeným akumulátorem.....	64
Obr.C4	Fotografie regulátoru – detail na přední a boční panel	64
Tab.4.1	Označení pinů displeje.....	29
Tab.4.2	Parametry pro POOL servis – Pragoboard [22].....	33
Tab.4.3	Označení souborů pro výrobu	34
Tab.B.1	Soupiska použitých součástek	62

9 Přílohy

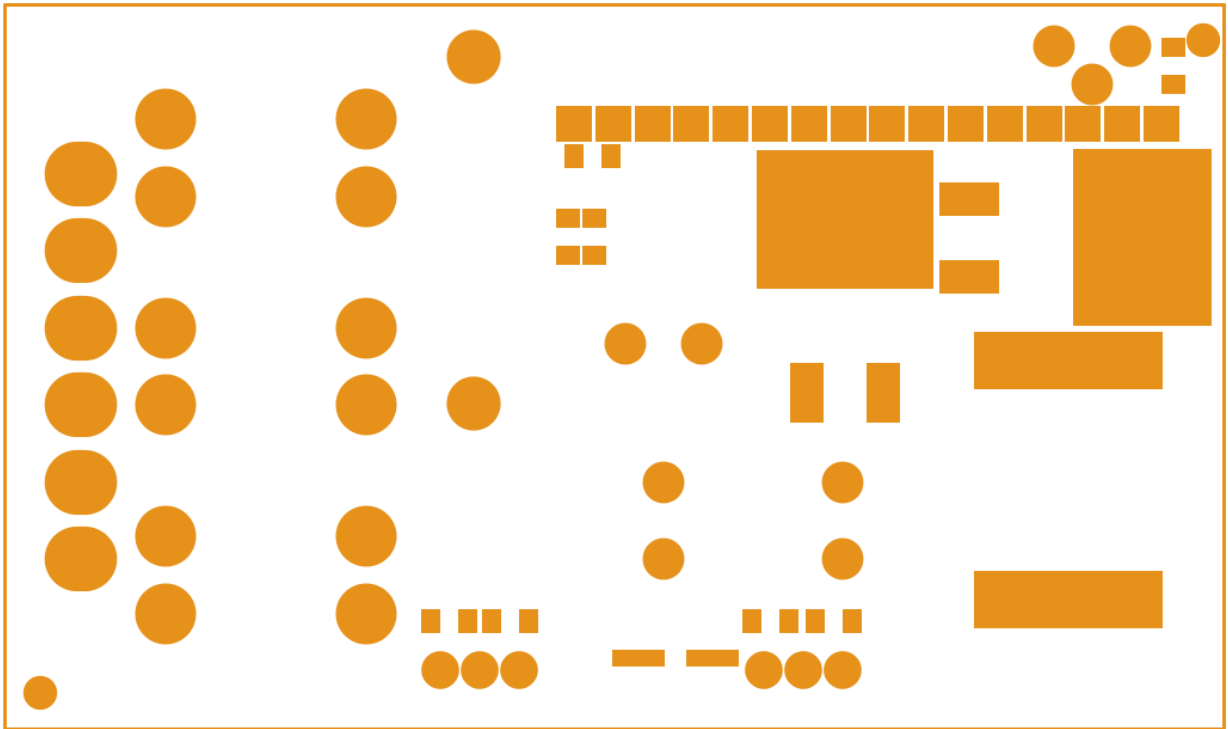
9.1 Příloha A – návrh DPS



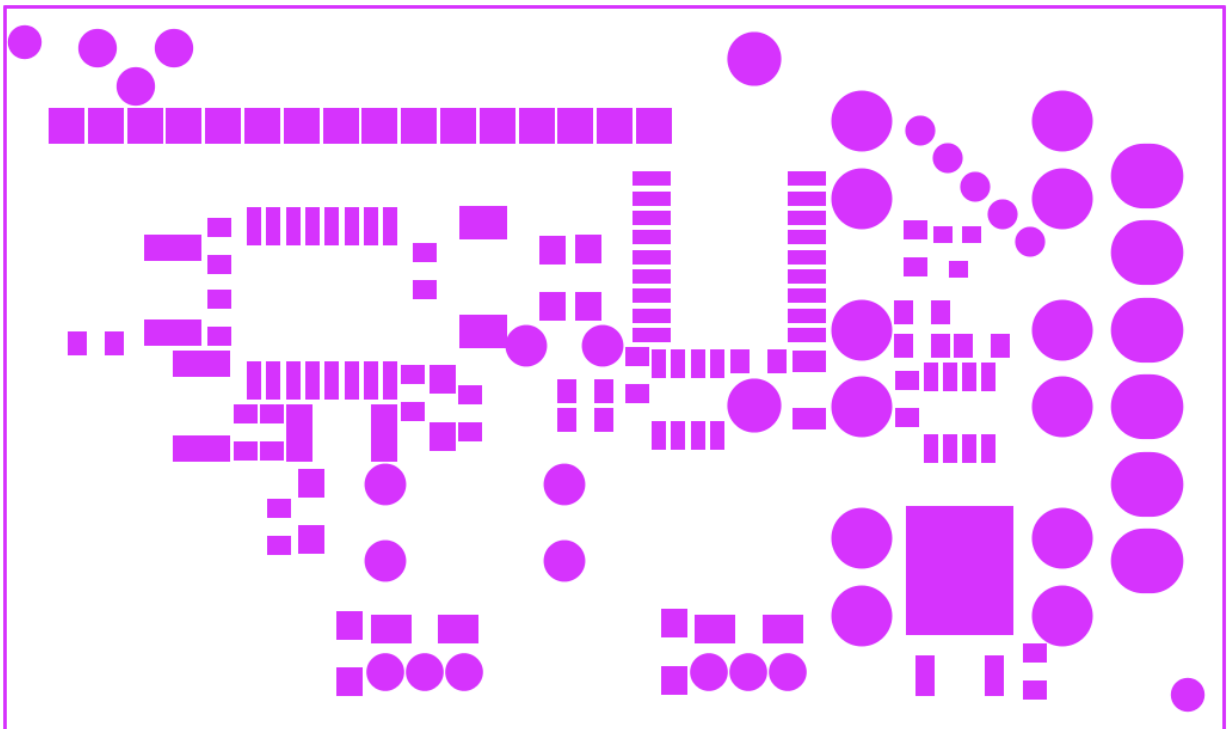
Obr.A1 Vrstva mědi TOP



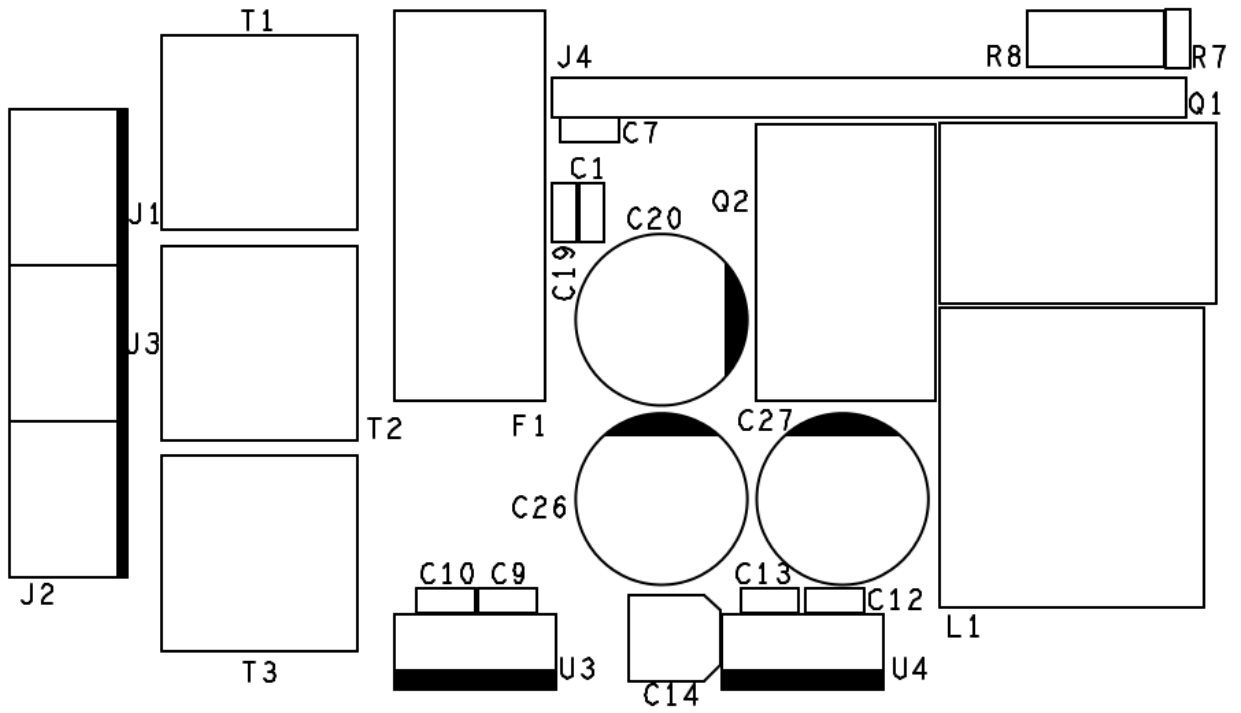
Obr.A2 Vrstva mědi BOTTOM – zrcadlená



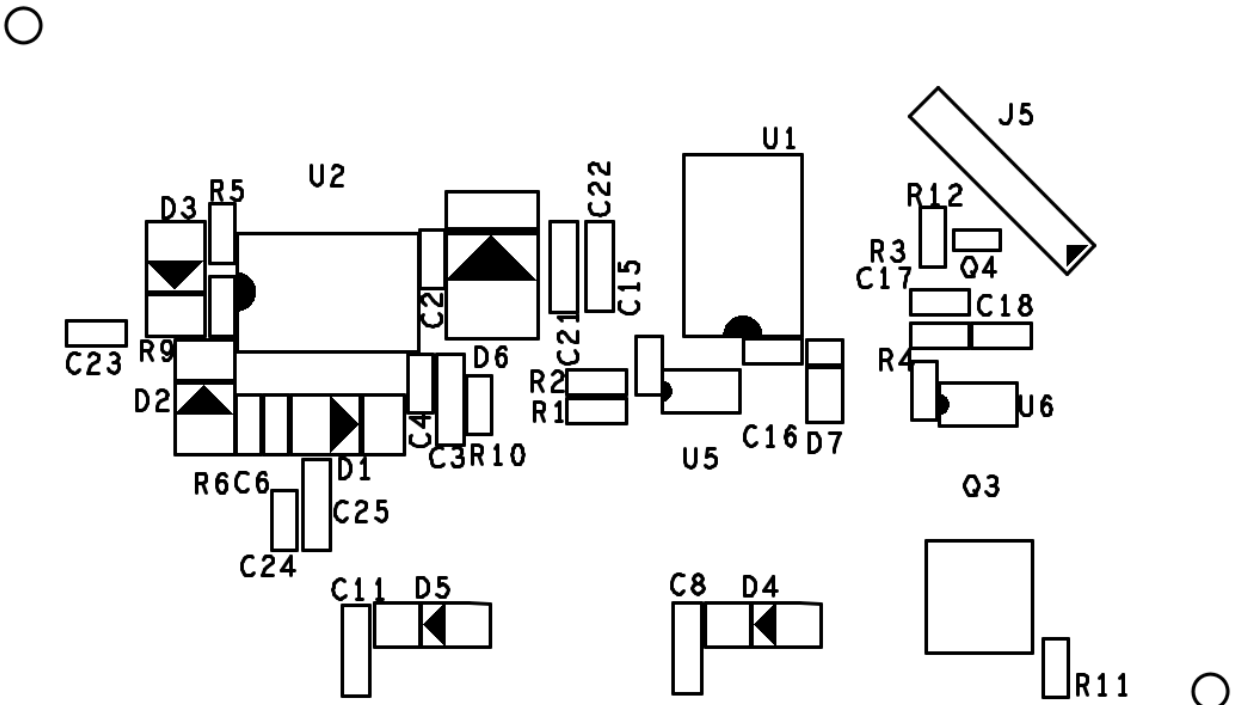
Obr.A3 Vrstva nepájivé masky TOP



Obr.A4 Vrstva nepájivé masky BOTTOM - zrcadlená

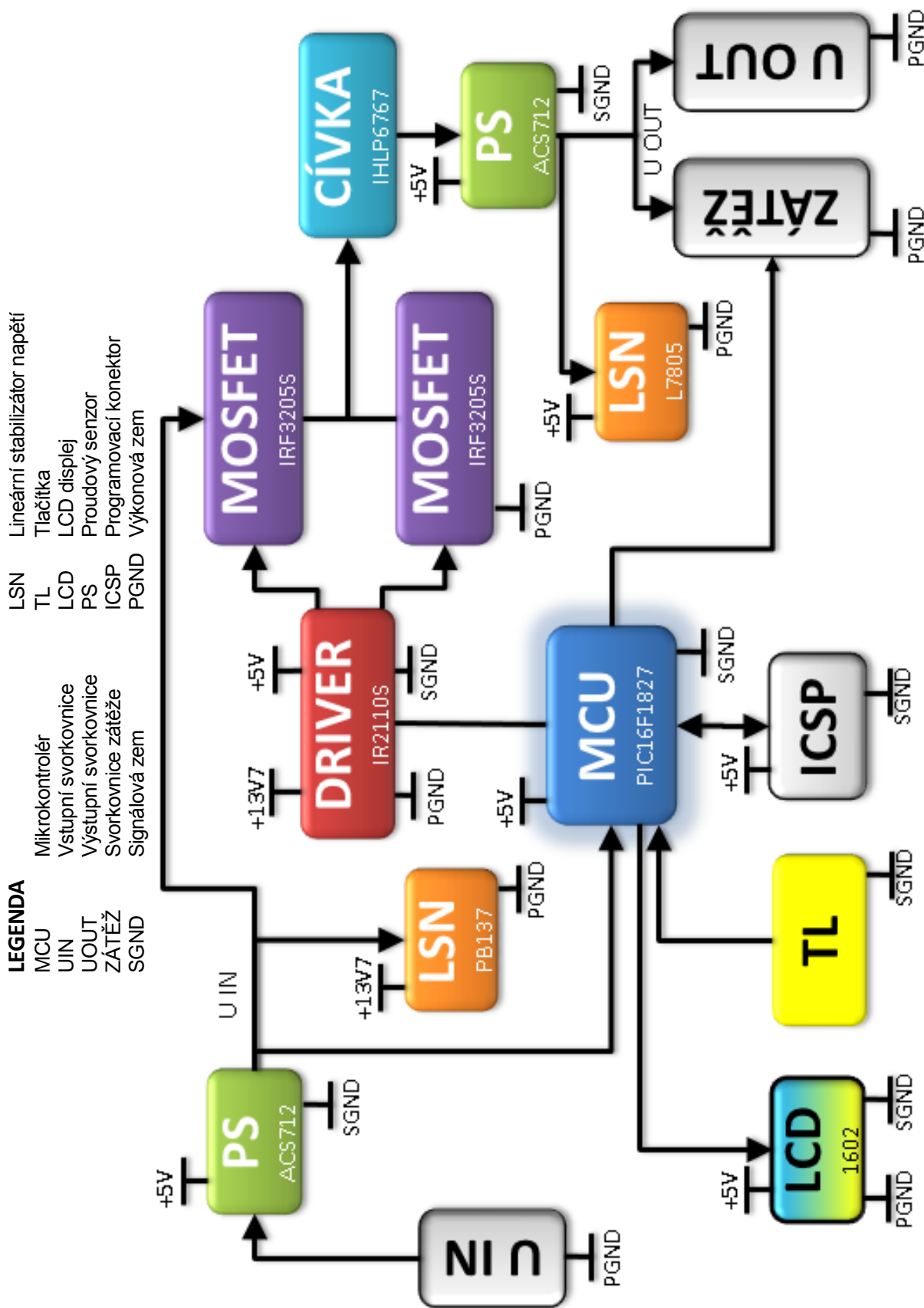


Obr.A5 Vrstva servisního potisku TOP

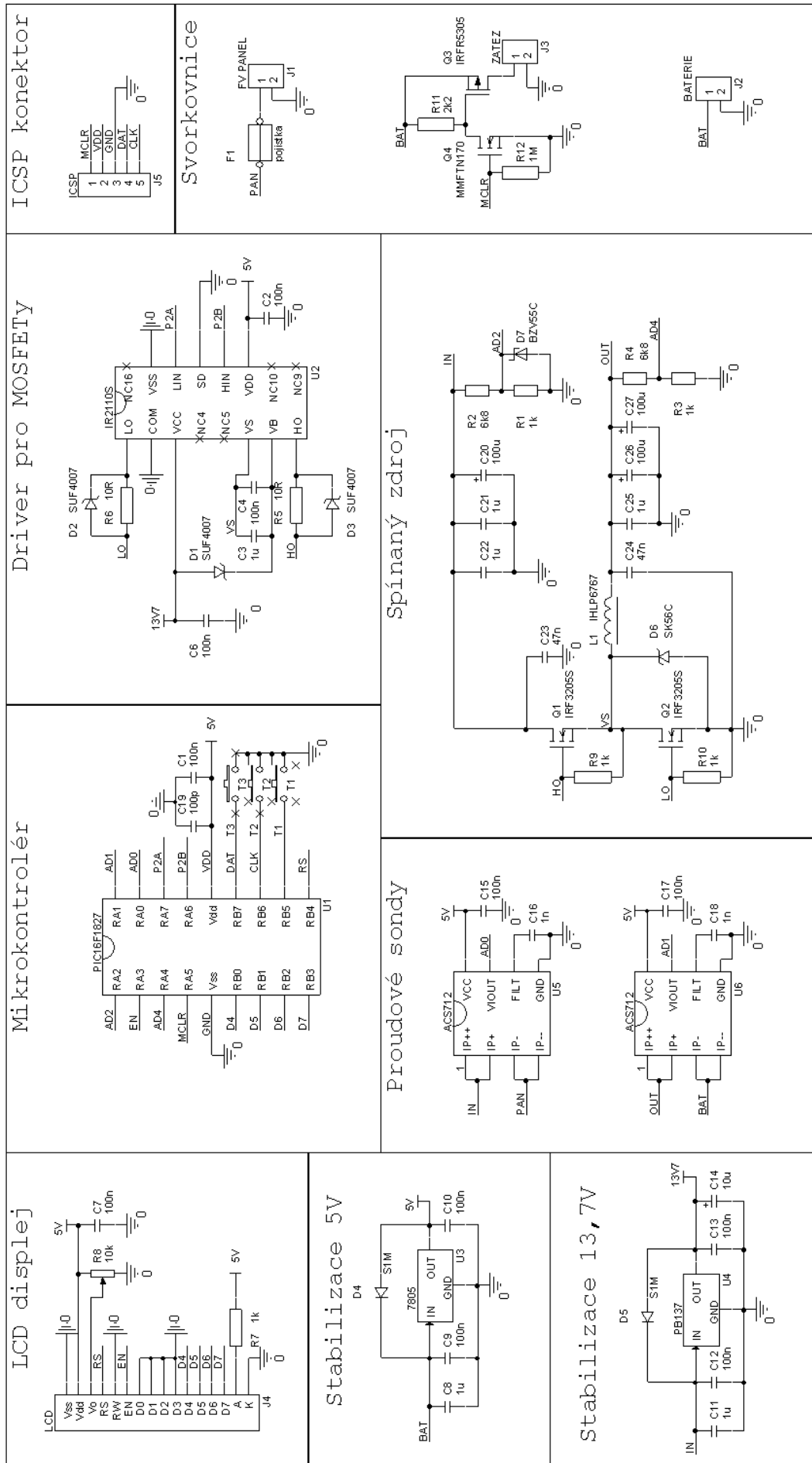


Obr.A6 Vrstva servisního potisku BOTTOM - zrcadlená

9.2 Příloha B – obvodové elektrické schéma



Obr.B1 Zjednodušené blokové schéma

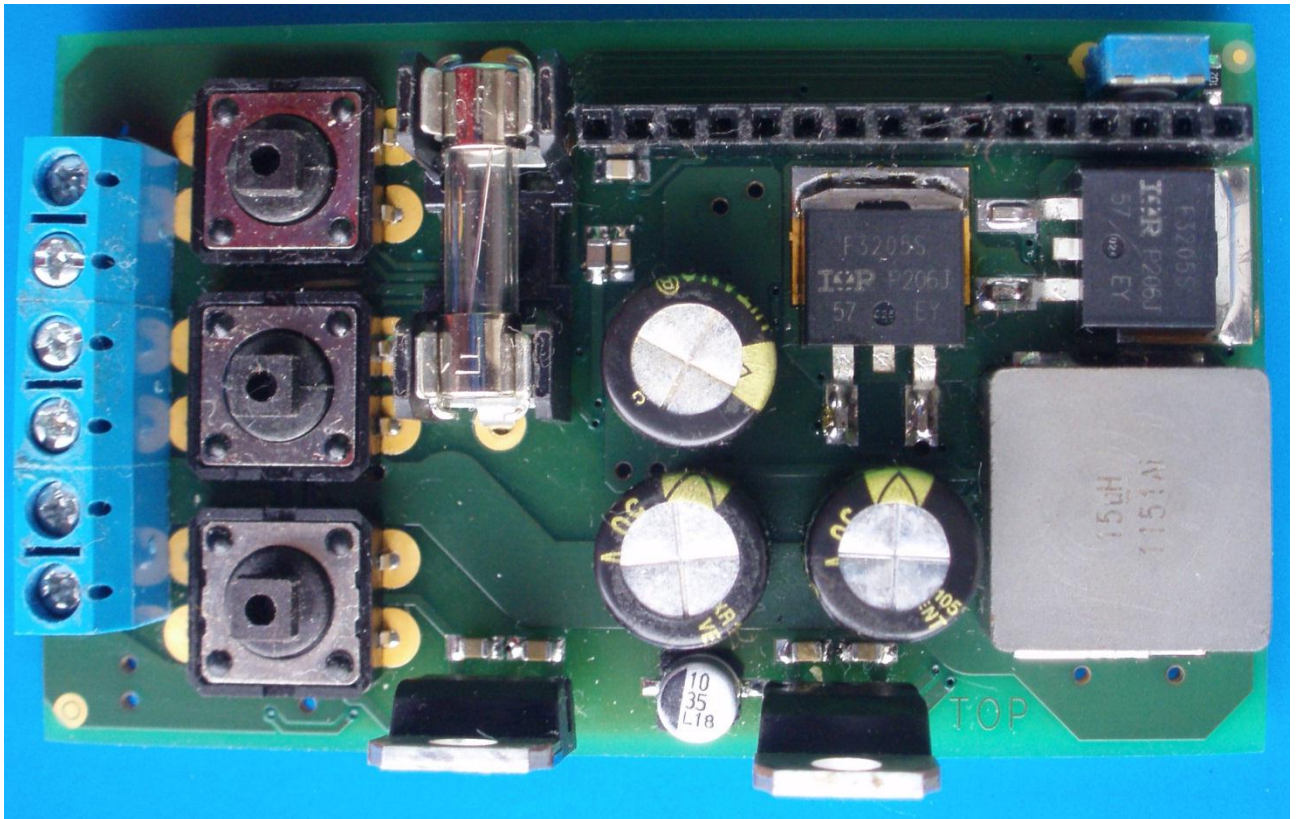


Obr.B2 Kompletní elektrické schéma

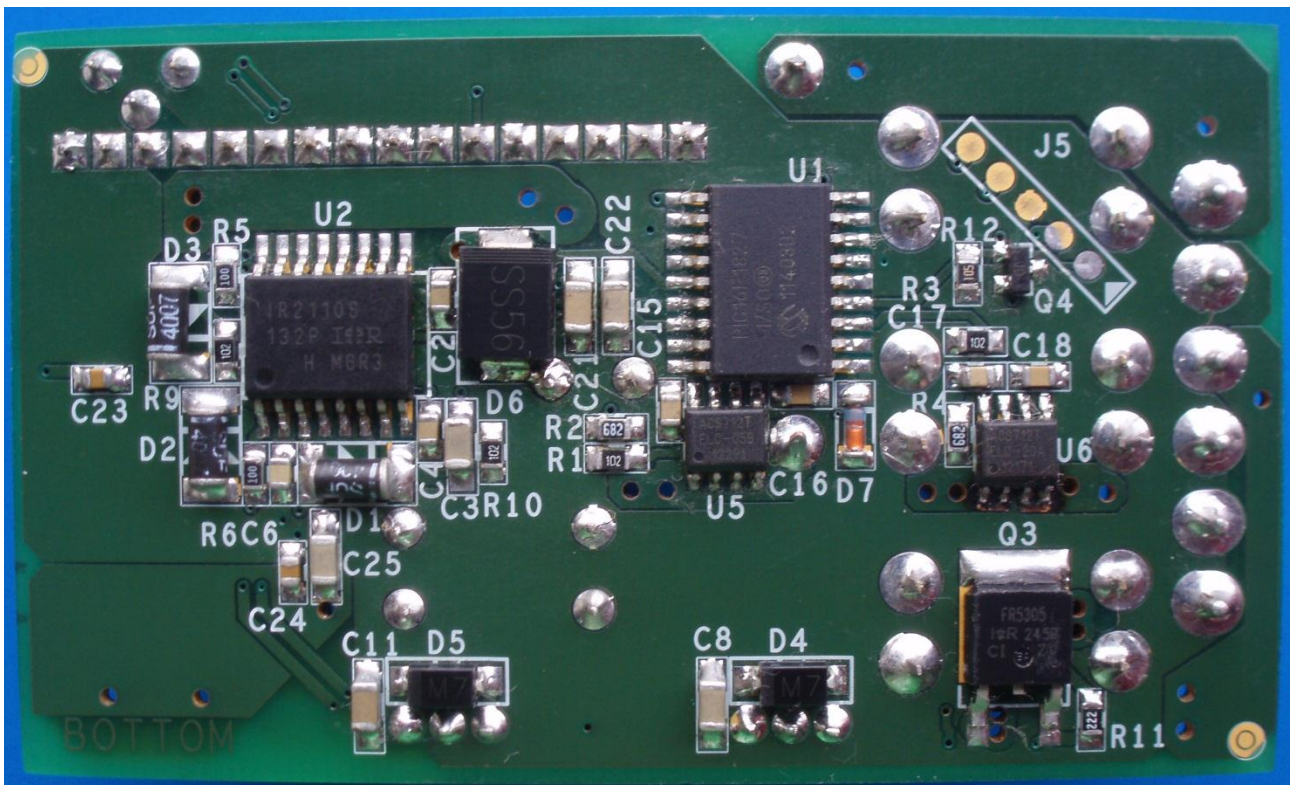
Reference	Hodnota	Reference	Hodnota
C1	100nF	F1	Pojistka 10A
C2	100nF	J1	ARK500
C3	1uF	J2	ARK500
C4	100nF	J3	ARK500
C6	100nF	J4	LCD
C7	100nF	J5	ICSP
C8	1uF	L1	IHLP6767, 15uH
C9	100nF	Q1	IRF3205S
C10	100nF	Q2	IRF3205S
C11	1uF	Q3	IRFR5305
C12	100nF	Q4	MFTN170
C13	100nF	R1	1k Ω
C14	10uF	R2	6.8k Ω
C15	100nF	R3	1k Ω
C16	1nF	R4	6.8k Ω
C17	100nF	R5	10 Ω
C18	1nF	R6	10 Ω
C19	100pF	R7	1k Ω
C20	100uF	R8	10k Ω
C21	1uF	R9	1k Ω
C22	1uF	R10	1k Ω
C23	47nF	R11	2.2k Ω
C24	47nF	R12	1M Ω
C25	1uF	T1	12x12x14mm
C26	100uF	T2	12x12x14mm
C27	100uF	T3	12x12x14mm
D1	SUF4007	U1	PIC16F1827
D2	SUF4007	U2	IR2110S
D3	SUF4007	U3	L7805
D4	S1M	U4	PB137
D5	S1M	U5	ACS712
D6	SK56C	U6	ACS712
D7	BZV55C	U7	LCD 1602

Tab.B.1 Soupiska použitých součástek

9.3 Příloha C – realizace zařízení



Obr.C1 Foto osazené DPS, strana TOP



Obr.C2 Foto osazené DPS, strana BOTTOM



Obr.C3 Fotografie regulátoru s připojeným akumulátorem



Obr.C4 Fotografie regulátoru – detail na přední a boční panel