



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta

Katedra aplikované fyziky a techniky

Fotovoltaické dobíjecí regulátory v ostrovních systémech

Diplomová práce

Vedoucí práce: prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.

Autor: Bc. Pavel Krčka

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá tématem fotovoltaických dobíjecích regulátorů využívaných v izolovaných, respektive ostrovních fotovoltaických systémech. Nejprve jsou popsány základní typy ostrovních instalací včetně jejich funkcí a aplikací v praxi. Následně jsou zmíněny možnosti akumulace elektrické energie ve fotovoltaických systémech a to s ohledem na současné, dostupné technologie, přičemž je podrobněji probrána problematika akumulace elektrické energie v olověných akumulátorech.

Hlavní část diplomové práce je pak věnována vlastním elektronickým návrhům fotovoltaických, jinak též zvaných solárních, dobíjecích regulátorů, které tvoří hlavní propojovací článek mezi fotovoltaickými panely, akumulátorem, ale často i připojovanou zátěží, čili spotřebičem. Jednotlivé elektronické koncepce regulátorů jsou podrobně popsány a v závěru práce též porovnány a zhodnoceny.

Abstract

This diploma thesis deals with photovoltaic rechargeable regulators used in isolated, or off-grid photovoltaic systems. First, basic types of off-grid installations, including their functions and applications in practice are described. Then, possibilities of electric energy accumulation in photovoltaic systems are mentioned, considering actual, accesible technologies. Matters of electric energy accumulation in leaden accumulators are examined in detail.

Main part of the diploma thesis is about electronic designs of photovoltaic, also called solar, rechargeable regulators. These are the main connecting part between photovoltaic panels, accumulator, but also often connected charge, which is appliance. Individual electronic regulators concepts are described narrowly, then compared and evaluated in thesis' conclusion.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pouze s použitím uvedených zdrojů.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě pedagogickou fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích

.....
Pavel Krčka

Poděkování

Touto formou děkuji svému konzultantovi panu profesoru Petru Špatenkovi, za cenné rady a připomínky při zpracování mé diplomové práce.

Obsah:

Úvod..	7
1 Ostrovní fotovoltaické systémy	8
2 Možnosti akumulace energie z fotovoltaických panelů	9
2.1 Elektrochemické akumulátory – základní parametry	11
2.2 Elektrochemické akumulátory používané v solárních systémech	13
2.3 Olověné akumulátory – princip akumulace energie	15
2.3.1 Speciální Pb–akumulátory používané v ostrovních FV systémech	16
3 Solární nabíjecí regulátory pro ostrovní systémy	19
3.1 Přizpůsobení regulátoru na systémové napětí	20
3.2 Ochranné funkce regulátoru	20
3.3 Indikace pracovních stavů při řízení provozu	21
3.4 Optimalizace řízení procesu nabíjení a vybíjení	21
3.5 Základní principy nabíjení FV regulátorů	22
3.5.1 Nabíjení konstantním proudem	24
3.5.2 Nabíjení konstantním napětím	25
4 Vlastní návrhy nabíjecích regulátorů pro ostrovní systémy	26
4.1 FV nabíjecí regulátor se stabilizátorem napětí LM317	26
4.1.1 Popis FV regulátoru se stabilizátorem LM317	26
4.1.2 Specifikace FV regulátoru se stabilizátorem LM317	27
4.1.3 Schéma zapojení FV regulátoru se stabilizátorem LM317	28
4.1.4 Zhodnocení FV regulátoru se stabilizátorem LM317	29
4.2 FV regulátor se stabilizátorem LM317 a procesorem PIC12F675	29
4.2.1 Popis FV regulátoru s integrovanými obvody LM317 a PIC12F675	29
4.2.2 Specifikace FV regulátoru s integrovanými obvody LM317 a PIC12F675	30
4.2.3 Schéma zapojení FV regulátoru s IO LM317 a PIC12F675	30
4.2.4 Zapojení a princip činnosti FV regulátoru s IO LM317 a PIC12F675	31

4.2.5	Funkce mikrokontroléru PIC12F675	32
4.2.6	Funkce automatického odpojení a připojení zátěže.....	33
4.2.7	Funkce automatického odpojení a připojení FV panelu	34
4.2.8	Nastavení FV regulátoru s integrovanými obvody LM317 a PIC12F675 ...	35
4.2.9	Zhodnocení FV regulátoru napětí s obvody LM317 a PIC12F675	36
4.3	FV regulátor napětí pracující v pulzním režimu (PWM).....	37
4.3.1	Popis spínaného FV regulátoru	37
4.3.2	Specifikace spínaného FV regulátoru	37
4.3.3	Schéma zapojení spínaného FV regulátoru	38
4.3.4	Zapojení a princip činnosti spínaného FV regulátoru	39
4.3.5	Princip automatického připojení / odpojení zátěže od akumulátoru	42
4.3.6	Nastavení spínaného FV regulátoru	44
4.3.7	Zhodnocení spínaného FV regulátoru	45
4.4	Fotovoltaický regulátor PWM s obvodem LM2576T-ADJ.....	46
4.4.1	Popis FV regulátoru s obvodem LM2576T-ADJ.....	46
4.4.2	Specifikace FV regulátoru s obvodem LM2576T-ADJ	46
4.4.3	Schéma zapojení spínaného FV regulátoru s obvodem LM2576T-ADJ.....	47
4.4.4	Zapojení a princip činnosti spínaného FV regulátoru s LM2576T-ADJ.....	48
4.4.5	Nastavení spínaného FV regulátoru s obvodem LM2576T-ADJ.....	50
4.4.6	Zhodnocení spínaného FV regulátoru s obvodem LM2576T-ADJ.....	50
5	Měření na vybraných FV regulátorech.....	51
5.2	Naměřené hodnoty na FV regulátoru s obvodem LM317	52
5.3	Naměřené hodnoty na FV regulátoru s obvodem LM2576T-ADJ.....	52
6	Závěr.....	53
7	Použitá literatura.....	54
8	Seznam zdrojů obrázkové dokumentace	56
9	Příloha – fotodokumentace k návrhům FV regulátorů.....	57

Úvod

Má diplomová práce komplexně pojednává o problematice ostrovních fotovoltaických systémů, které nejsou připojeny k běžné rozvodné síti a tvoří tak izolovanou a nezávislou elektrickou napájecí soustavu. Práce je však především zaměřena na fotovoltaické dobíjecí regulátory, které jsou v těchto izolovaných systémech nedílnou součástí a umožňují efektivně ukládat a využívat energii ze slunečního záření.

V úvodní části jsou uvedeny tři základní typy ostrovních – izolovaných fotovoltaických instalací, přičemž jsou zde specifikovány jejich dispozice včetně adekvátního použití.

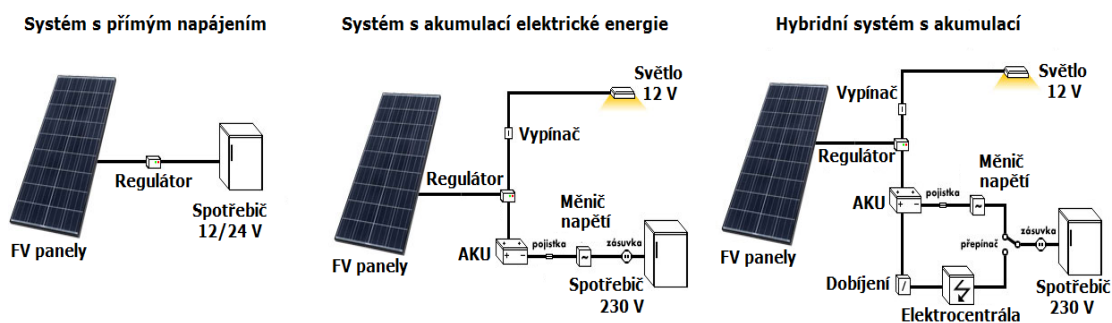
Další část práce popisuje současné možnosti ukládání, resp. akumulaci elektrické energie ve fotovoltaických systémech, která byla získána přeměnou slunečního záření pomocí fotovoltaických panelů. V této kapitole jsou uvedeny současné, dostupné technologie, které jsou pro tento účel použitelné. Větší pozornost je věnována olověným akumulátorům, které jsou pro akumulaci elektrické energie v ostrovních solárních systémech nejvhodnější a tudíž i nejrozšířenější.

Následující kapitoly se již zabývají tematikou fotovoltaických, neboli solárních dobíjecích regulátorů, jejichž dobíjecí možnosti a další doplňkové funkce výrazně ovlivňují celkovou kvalitu a efektivitu fotovoltaické izolované soustavy. Jsou zde prezentovány hlavně vlastní jednoduché elektronické návrhy dobíjecích regulátoru, přičemž jsou podrobně popsány jejich technické parametry včetně správného nastavení.

V závěrečné části práce jsou pak uvedené elektronické koncepce dobíjecích regulátorů porovnány a to s ohledem na jejich dobíjecí účinnost, čili efektivitu a ochranné funkce, které významně ovlivňují celkovou činnost ostrovního fotovoltaického systému a životnost akumulátorů.

1 Ostrovní fotovoltaické systémy

Už sám název tohoto fotovoltaického systému výstižně specifikuje princip celé soustavy. Ostrovní fotovoltaické systémy, jinak nazývané též izolované solární systémy (grid-off systems), jsou instalace nezávislé na rozvodné síti, to znamená, že s ní nejsou nijak spojeny [1]. Realizují se zejména v případě, kdy není možné napájet spotřebiče z veřejné rozvodné sítě, nebo tam, kde by bylo vybudování nového přípojného místa nerentabilní. Instalované výkony ostrovních FV systémů se obvykle pohybují od 1 W do 10 kW, přičemž je kladen důraz na minimální ztráty energie, což je spojeno i s použitím energeticky úsporných spotřebičů. Ostrovní systémy můžeme dále rozdělit na systémy s přímým napájením, systémy s akumulací elektrické energie a hybridní systémy (viz. obr. 1.).



Obrázek 1.: Typy instalací ostrovních systémů

Systémy s přímým napájením se používají v případech, kde není nutné akumulovat elektrickou energii, tudíž je dostačující, že takto připojené spotřebiče jsou aktivní pouze při dostatečné intenzitě slunečního záření. Jedná se o prosté spojení fotovoltaického panelu se spotřebičem přes jednoduchý regulátor. Tyto systémy se využívají například pro napájení vodních čerpadel při zavlažování, pro napájení různých ventilátorů, pro pohon protislunečních clon, popřípadě pro natáčení FV systémů typu TRAXLE.

Oproti tomu systémy disponující akumulací elektrické energie, jsou zřejmě nejrozšířenější. Nevýhodou využívání solární energie je bezesporu nestálost intenzity slunečního záření. V praxi je však potřebné, mít elektrickou energii stále k dispozici i v době bez slunečního svitu, například při zatažené obloze či v noci. Proto je žádané v době přebytku energie z FV panelů energii ukládat - akumulovat.

Možnosti akumulace elektrické energie v ostrovních systémech budou popsány v následujících kapitolách.

Posledním typem ostrovních FV systémů jsou systémy hybridní. Jedná se o FV systém s akumulací elektrické energie, který je dále rozšířen, resp. doplněn dalším alternativním zdrojem elektrické energie, například malou vodní či větrnou elektrárnou, elektrocentrálou, popřípadě kogenerační jednotkou. Z tohoto důvodu jsou hybridní systémy schopny dodat více energie a pokrýt tak větší energetickou spotřebu, než je tomu v případě samotného FV systému.

2 Možnosti akumulace energie z fotovoltaických panelů

Akumulaci elektrické energie z fotovoltaických systémů lze v současné době realizovat několika způsoby. Záleží především na typu aplikace. První možnost akumulace elektrické energie reprezentují speciální velkokapacitní kondenzátory (viz. obr. 2.), popřípadě kondenzátorové baterie. Tento způsob akumulace se používá jen zřídka například pro speciální účely - k pohonu různých zařízení [2]. Výhodou kondenzátorů, popřípadě kondenzátorových baterií je to, že se elektrická energie ukládá ve formě elektrostatického pole mezi elektrodami (polarizace dielektrika). Tento princip akumulace elektrické energie přináší dlouhou životnost - velký počet nabíjecích a vybíjecích cyklů, značnou účinnost a velmi velký vybíjecí proud. Nevýhodou je zejména to, že velkokapacitní kondenzátor, popř. kondenzátorová baterie pojme mnohem menší množství energie v porovnání s běžně používanými elektrochemickými akumulátory podobné velikosti. Množství energie nabitého kondenzátoru je možné z kalkulovat pomocí vztahu $E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$ [J].



Obrázek 2.: Velkokapacitní kondenzátor 1,2 F / 24 V

Další potenciální, moderní, avšak převážně experimentálně testovanou alternativou je akumulace elektrické energie do vodíku vyráběného elektrolýzou vody. Velmi jednoduše lze takovouto sestavu specifikovat jako spojení elektrolyzéry - vývojky, zásobníku vodíku a vodíkového palivového článku, ve kterém se chemickou cestou (oxidačně-redukční reakce) přeměňuje vodík zpět na elektrickou energii [3]. Takovýto systém má výhodu v tom, že jeho kapacita je dána jen velikostí vodíkové nádrže (plynojemu) a nemá nežádoucí energetické ztráty samovybíjením. Používání vodíku však přináší i problémy. Vodík je prudce výbušný, lehký, má nízkou hustotu, snáze uniká netěsnostmi a může difundovat do kovů (křehnutí ocelí), což klade vyšší nároky na konstrukci zmiňovaného akumulačního systému. Pořizovací náklady jsou zatím dosti vysoké, proto je tato potenciální alternativa akumulace spíše experimentálně rozšířena, přičemž je tato technologie stále ve vývoji. Nicméně se ale jedná o perspektivním trend budoucnosti.

K ukládání elektrické energie z fotovoltaických elektráren se běžně využívají přečerpávací elektrárny [2]. Jejich funkce je založena na přečerpávání vody z níže položené nádrže spojujícím potrubím pomocí reverzní turbíny do výše položené nádrže. Přečerpávání ze spodní do horní nádrže probíhá v důsledku přebytku energie při dostatečné intenzitě slunečního záření, přičemž při tom přečerpávaná voda zvyšuje svou potenciální, čili polohovou energii. V době nedostatku energie se proces cíleně obrátí a voda proudící z horní nádrže do spodní předá svou kinetickou, resp. pohybovou energii turbíně, která v tomto případě pohání generátor, jenž vytváří elektrickou energii. Velikost nádrží, turbíny i generátoru je třeba dimenzovat podle výkonu FV systému.

Pro akumulaci elektrické energie v ostrovních systémech se však v současné době používají převážně elektrochemické akumulátory nejrůznějších typů, které lze opakovaně nabíjet a to ještě v kombinaci s regulátorem nabíjení, který řídí proměnlivý tok energie z FV panelů [1]. V akumulátorech se pak ukládá elektrická energie prostřednictvím vratných chemických reakcí. Existují různé typy, resp. různé konstrukce, které se liší především funkčními prvky zúčastňujícími se procesu ukládání energie. Základní parametry elektrochemických akumulátorů včetně nejpoužívanějších typů jsou popisovány v následujících kapitolách.

2.1 Elektrochemické akumulátory – základní parametry

Jak již bylo naznačeno, tak elektrochemické akumulátory ukládají energii ve formě chemické energie [4]. Jejich výhodou je dobře zvládnutá technologie výroby, operativní použití kdekoliv, možnost mnohonásobného opětovného nabíjení a relativně nízká cena. Nevýhodou je samovybíjení a citlivost na hluboké vybíjení, při kterém nastávají nevratné změny na elektrodách s následkem snižování kapacity akumulátoru. Rovněž poměr akumulované energie ke hmotnosti akumulátoru činí tento způsob akumulace stále málo efektivní. Mezi základní parametry akumulátorů patří počet článků, což souvisí s celkovým svorkovým napětím akumulátoru, dále mezní napětí akumulátoru v nabitém a vybitém stavu, kapacita, vnitřní odpor, hloubka vybití, počet nabíjecích a vybíjecích cyklů, a samovybíjení.

Běžně dostupné elektrochemické akumulátory se obvykle skládají z několika sériově spojených elektrochemických článků a to z důvodu dosažení vhodného celkového napětí akumulátoru (např. 6 V, 12 V, 24 V, popř. 36 V). V závislosti na použitém typu materiálu elektrod a elektrolytu mohou mít tyto články i různé elektrické napětí běžně od 1,1 až do 3 V. Jako příklad mohu uvést klasický olověný akumulátor (autobaterie), který je tvořen 6-ti sériově spojenými články, a protože každý článek dosahuje napětí přibližně 2 V, je celkové napětí olověného akumulátoru cca 12 V.

Mezní napětí akumulátoru udávají ve své podstatě dovolený rozsah, ve kterém lze akumulátor provozovat, aniž by došlo k jeho poškození. Důležité jsou zde hlavně dvě hodnoty, a sice napětí odpovídající plně nabitému a vybitému akumulátoru. Nutno dodat, že se tato mezní napětí opět liší v závislosti na typu elektrochemického akumulátoru. Kupříkladu zmíněný typ – olověný 12-ti voltový akumulátor [5], má svorkové napětí v ustáleném nabitém stavu v rozmezí od 12,6 – 12,8 V, kdežto ve vybitém stavu jen 10,2 – 10,8 V. Tyto hodnoty jsou adekvátní pouze v případě, kdy je akumulátor v klidu, tj. nevydává ani nepřijímá žádný proud. Pro nabíjení je však potřebné o něco vyšší napětí – při plném nabití by mělo napětí akumulátoru dosáhnout hodnoty 13,8 – 14,4 V. Po ukončení nabíjení napětí akumulátoru mírně poklesne právě na ustálenou hodnotu odpovídající nabitému akumulátoru v klidovém stavu, tj. 12,6 – 12,8 V.

Kapacita akumulátoru udává množství elektrické energie, které akumulátor dokáže pojmout. Jinak řečeno je to vlastně množství elektrického proudu, které je možno odebrat z nabitého akumulátoru do jeho úplného vybití [1]. Kapacita je udávaná v jednotkách Ah (Ampérhodiny). Například při kapacitě akumulátoru 100 Ah je teoreticky možné z akumulátoru odebírat proud o velikosti 1 A po dobu 100 hodin. Je třeba dodat, že kapacitu akumulátoru ovlivňuje jednak velikost vybíjecího proudu, ale také teplota. Čím je akumulátor chladnější, tím méně elektrického proudu je možné z něho celkově odebrat v důsledku pomaleji probíhajících chemických procesů.

Vnitřní odpor akumulátoru, udávaný obvykle v ohmech, není konstantní veličinou, nýbrž se v průběhu nabíjení a vybíjení neustále mění [5]. Ideální akumulátor by měl nulový vnitřní odpor a dokázal by dodat maximální proud bez poklesu jeho svorkového napětí. U skutečného akumulátoru tomu tak však není. Při jeho zatížení, resp. proudovém odběru vždy klesá jeho svorkové napětí, což je způsobeno zvětšujícím se vnitřním odporem při vybíjení. Čím je hodnota vnitřního odporu akumulátoru nižší v porovnání se stejně nabitým akumulátorem jiného typu, tím se jedná o tzv. tvrdší zdroj.

Hloubka vybití, uváděna obvykle v procentech, určuje v podstatě množství odebrané energie, nebo též vyčerpanou kapacitu akumulátoru. Elektrochemické akumulátory jsou citlivé na hluboké vybíjení, které nastane, pokud se akumulátor vybíjí natolik, že jeho svorkové napětí klesne až na úroveň spodního mezního napětí (např. 10,5 V u Pb-AKU) případně i pod ní. Tento stav výrazně zkracuje životnost akumulátorů a snižuje též celkovou kapacitu v důsledku poškození elektrod (sulfatace). Hluboké vybíjení je v praxi nežádoucí a proto je nutné ukončit vybíjecí proces akumulátorů nejpozději při vyčerpání 75 až 80 % jejich kapacity.

Dalším parametrem je počet nabíjecích a vybíjecích cyklů udávaný výrobcem. Počet nabíjecích a vybíjecích cyklů, který akumulátor snese, je mírou životnosti akumulátoru [1]. Tento údaj udává vlastně maximální počet možných nabití a vybití. Rozlišují se *úplné cykly*, u kterých se akumulátor vybije až ke koncovému vybíjecímu meznímu napětí, a *částečné cykly*, kdy se odebere pouze část kapacity akumulátoru.

Počet částečných cyklů, kterými lze olověný akumulátor během jeho životnosti zatížit, je značně vyšší než počet úplných cyklů. Je celkem pochopitelné, že v případě většiny solárních aplikací se akumulátory vybíjejí obvykle jen částečně, tudíž vydrží větší počty cyklů (např. pro Pb-akumulátory s tekutým elektrolytem se uvádí počet 450-600 cyklů, pro gelové akumulátory až 2000 cykl.).

Samovybíjení, udávané v procentech, probíhá v důsledku vedlejších chemických reakcí elektrod s elektrolytem, jinými slovy se každý akumulátor časem samovolně vybije. Samovybíjení probíhá pomalu a při pokojové teplotě činí v závislosti na typu elektrochemického akumulátoru i několik procent z jeho jmenovité kapacity za měsíc. Kupříkladu u olověných akumulátorů se samovybíjení pohybuje od 2 do 10 % jmenovité kapacity za měsíc. Horní hranice je obvyklá u běžných olověných akumulátorů. U kvalitnějších typů akumulátorů (např. gelové), určených pro ostrovní FV systémy, je samovybíjení podstatně nižší 2 až 3 % kapacity za měsíc.

Některé z uvedených parametrů nejsou standardně na akumulátorech uváděny, nicméně jsou obvykle k dispozici v technickém listu či jiné dokumentaci od výrobce a jsou velmi důležité při návrhu ostrovního FV systému včetně jeho ostatních komponent!

2.2 Elektrochemické akumulátory používané v solárních systémech

Ve fotovoltaických systémech se v současné době používají v zásadě tři typy elektrochemických akumulátorů, a sice *alkalické*, *lithium-iontové* a samozřejmě *olověné*. Každý z těchto typů akumulátorů disponuje rozdílnými vlastnostmi, a proto se liší i z hlediska praktické aplikace.

Do skupiny alkalických akumulátorů patří nikl-kadmiové (Ni-Cd), nikl-metalhydridové (NiMH) a nikl-ocelové (Ni-Fe) akumulátory. Ve fotovoltaických systémech se však z této skupiny používají převážně jen průmyslové Ni-Cd akumulátory s kapsovými elektrodami, a to ještě poměrně zřídka [3]. Výhodou Ni-Cd akumulátorů je především jejich delší životnost (uvádí se životnost 10-20 let při cyklech s 60-80 % vybíjením). Dobře také snášejí dlouhodobé vybíjení.

Nevýhodou je naopak tzv. „paměťový efekt“, tj. pokles kapacity akumulátorů, pokud se občasné nevybíjí zcela. Také samovybíjení Ni-Cd akumulátorů je vyšší, zvláště při teplotách nad 25 °C. Uvádí se, že prvních 10-20 dnů je ztráta náboje 1 - 2 % za den. Energetická účinnost je nižší než u klasických olověných akumulátorů. Díky nižšímu napětí jednoho článku (přibližně 1,2 V) je také nutný větší počet článků spojených do série pro dosažení potřebného napětí (nutnost 10 článků na 12 V baterii, místo 6 článků jako u olověného akumulátoru). Kadmium je v neposlední řadě navíc zařazeno mezi nebezpečný odpad.

Lithium-iontové akumulátory (zkráceně Li-Ion) zažívají v poslední době velký rozmach v zařízeních spotřební elektroniky zejména v oblasti mobilních a přenosných přístrojů. Pro stacionární solární aplikace jsou však zatím neúměrně drahé, nicméně se používají například při závodech solárními články poháněných vozidel [3]. Jejich hlavní předností je výrazně malá hmotnost, která dosahuje jen asi 20 % hmotnosti běžného bezúdržbového olověného akumulátoru. Lithium-iontové akumulátory pojmu též asi třikrát více energie než zmíněné nikl-kadmiové akumulátory (Ni-Cd) stejné velikosti. Lithium je nejlehčí kov a díky své vysoké chemické reaktivitě poskytuje relativně vysoké napětí článku (až 3,6 V). Tyto akumulátory mají též zanedbatelné samovybíjení a netrpí takzvaným „paměťovým efektem“. Významnou nevýhodou je bohužel relativně krátká životnost (u běžných malých lithium-iontových akumulátorů je to jen 2 až 3 roky!) a postupná ztráta kapacity s časem bez ohledu na to, zda je akumulátor používán, nebo ne. Tyto akumulátory jsou též oproti ostatním typům více náchylné k poškození či zničení způsobeným hlubokým vybíjením či přebíjením.

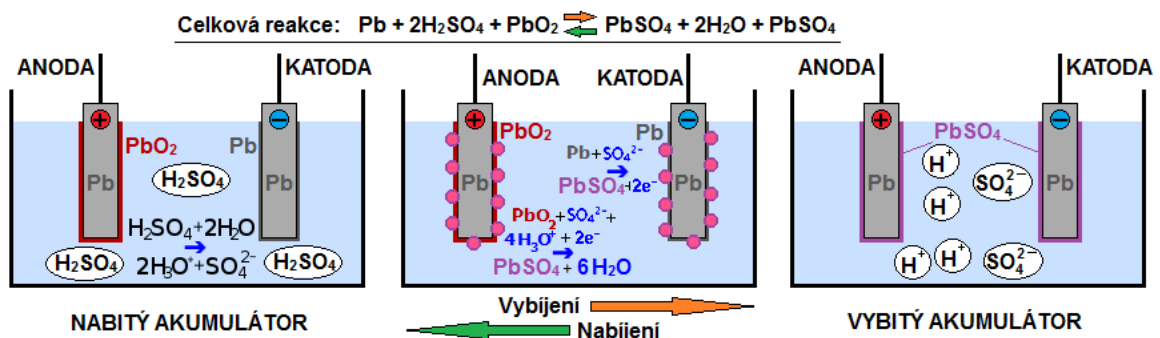
Ve fotovoltaických systémech se dnes však používají výhradně dlouho osvědčené olověné akumulátory [1], jejichž technologie je dokonale zvládnutá. Proto i FV dobíjecí regulátory, na které je zaměřena má diplomová práce, jsou koncipovány právě pro tento typ akumulátorů. Z tohoto důvodu bude problematika olověných akumulátorů v následujících kapitolách popsána podrobněji.

2.3 Olověné akumulátory – princip akumulace energie

Jak již zde bylo naznačeno, tak se elektrická energie z FV panelů ukládá v akumulátorech prostřednictvím vráných chemických reakcí [1]. Klasický olověný akumulátor tvoří elektrochemické články s olověnými elektrodami a elektrolytem je zředěná kyselina sírová, která v roztoku disociuje na kladné vodíkové ionty a záporné síranové ionty [4].

V nabitém stavu je záporná elektroda (katoda) tvořena čistým šedým olovem (Pb) „houbovitého“ charakteru, kdežto kladná elektroda (anoda) je potažena vrstvou červenohnědého oxidu olovičitého (PbO₂).

Během vybíjení reaguje materiál elektrod s elektrolytem a na obou elektrodách vzniká síran olovnatý (PbSO₄), přičemž elektrolyt je ochuzován o kyselinu sírovou a současně obohacován o vodu, tudíž klesá hustota elektrolytu, resp. koncentrace kyseliny sírové (viz. obr.3.).



Obrázek 3.: Princip vybíjení a nabíjení olověného akumulátoru

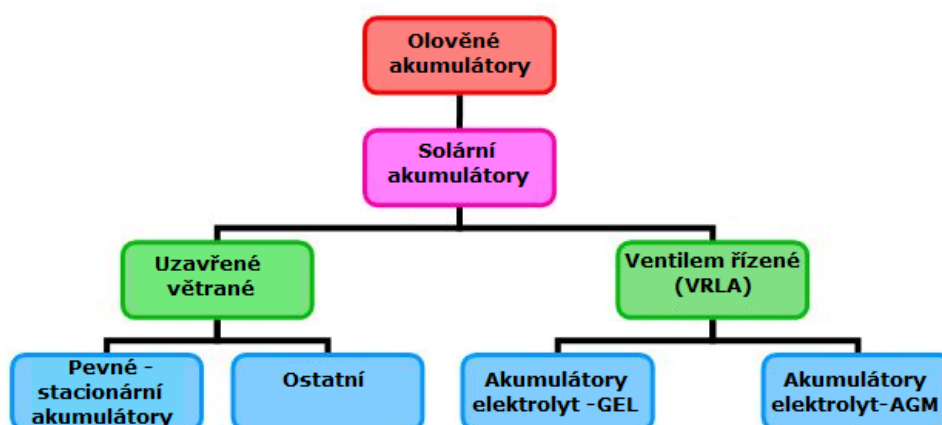
Při nabíjení probíhá tento proces v důsledku připojení nabíjecího napětí obráceně, čili hustota elektrolytu roste – koncentrace kyseliny se opět přibližuje počáteční hodnotě. Z uvedených informací je patrné, že se koncentrace kyseliny sírové v celém procesu nabíjení a vybíjení neustále mění. Proto je možné a v praxi i často používané měřením koncentrace kyseliny určit stav nabití olověného akumulátoru. Během dobíjení může však dojít i k tomu, že začne probíhat elektrolyza vody. Na kladné elektrodě se pak vylučuje plynný kyslík a na záporné elektrodě plynný vodík. V otevřeném článku tyto oba plyny unikají a důsledkem je úbytek vody v akumulátoru. Proto je u klasického akumulátoru zapotřebí dohlížet na stav elektrolytu, popřípadě doplňovat elektrolyt o destilovanou vodu.

Existují však vyspělejší elektrochemické akumulátory, tzv. bezúdržbové, které jsou konstrukčně uzpůsobeny tak, že v porovnání s klasickým olověným akumulátorem nevyžadují téměř žádnou údržbu, tudíž nevyžadují kontrolu ani doplňování elektrolytu viz následující podkapitola.

2.3.1 Speciální Pb–akumulátory používané v ostrovních FV systémech

Ostrovní provoz je z pohledu akumulátoru hodně specifický [6]. Jedná se o systém, ve kterém slouží akumulátor jakožto zdroj elektrické energie, který se v případě přebytků energie nabíjí a v případě nedostatku energii poskytuje. Jedná se o tzv. cyklický provoz, tedy neustálé vybíjení a nabíjení, což je pro samotný akumulátor velice náročné. Kupříkladu běžné startovací akumulátory na 12 V jsou pro tento účel zcela nevhodné, protože mají velké samovybíjení až 20 % za měsíc a snesou jen malý počet nabíjecích cyklů, obvykle 450 – 600 cyklů. Jejich případné použití v solárních systémech je spíše z nouze ctnost. Proto se pro tento účel využívají speciální solární akumulátory, které mají elektrody článků a aktivní hmotu (elektrolyt) přizpůsobenou tak, aby byly schopny odolat cyklickému provozu a též vybíjení i ve stavu pouze částečného nabití.

Speciální solární akumulátory můžeme rozdělit dle konstrukčního uspořádání na uzavřené – větrané, které vyžadují určitou údržbu a ventilem řízené akumulátory, které jsou v podstatě bezúdržbové (viz. obr.4.).



Obrázek 4.: Rozdělení speciálních solárních akumulátorů

Uzavřené větrané solární akumulátory vyžadují údržbu ve smyslu pravidelné kontroly stavu elektrolytu, případně je u nich nutné, jak již bylo naznačeno, doplňovat elektrolyt o destilovanou vodu. Z tohoto důvodu bývají tyto akumulátory na horním víku doplněny o šroubovací inspekční zátky či jiný mechanismus, který doplňování umožňuje.

Do této skupiny patří stacionární akumulátory, jinak zvané též pevně umístěné akumulátory s pancéřovými deskami, které vyrábí například německá



Obrázek 5.: Stacionární akumulátory

firma Hoppecke (viz. obr.5.). Tyto akumulátory se vyznačují robustní konstrukcí a značně vysokou cyklickou životností. Výrobce uvádí vysoký počet nabíjecích a vybíjecích cyklů [8] až 3500 při denních nabíjecích a vybíjecích cyklech s hloubkou vybití od 30 do 40 %. Při správném zacházení mohou dosáhnout tyto typy akumulátorů životnosti až 20 let [1]. Akumulátory s pancéřovými deskami se velmi často používají ve fotovoltaických

ostrovních systémech k ukládání velkého množství elektrické energie. Navzdory dvakrát až třikrát vyšší ceně ve srovnání s klasickými akumulátory s mřížkovými deskami představují díky až pětinasobné cyklické životnosti hospodárnější řešení.

Ostatní solární akumulátory, které patří do skupiny uzavřených větraných akumulátorů se zaplavenými elektrodami (viz. obr.6.), jsou ve své podstatě modifikované startovací baterie se zesílenými mřížkovými deskami – elektrodami [1]. Takovéto solární akumulátory představují sice levnější, avšak ne tak kvalitní řešení. Oproti startovacím bateriím jsou schopné snést dvakrát až třikrát větší počet nabíjecích a vybíjecích cyklů, čemuž odpovídá vyšší životnost. Současně je u nich vhodnou technologií (dotace elektrod, vhodné separátory elektrod) sníženo samovybíjení na 2 % až 10 % za měsíc.



Obrázek 6.: Solární akumulátor 12V/100Ah

Ventilem řízené akumulátory představují skupinu tzv. bezúdržbových akumulátorů [6], u kterých není zapotřebí kontrolovat hladinu elektrolytu ani doplňovat destilovanou vodu. Bezúdržbové akumulátory se dále dělí na *gelové* a *AGM*. Zásadní rozdíl mezi zmíněnými akumulátory spočívá ve fixaci elektrolytu uvnitř akumulátoru.

Akumulátory AGM (Absorbed Glass Mat.) mají olověné elektrody jednotlivých článků obvykle mřížkové, přičemž jsou odděleny speciálními separátory [7]. Tyto separátory jsou tvořeny jakýmsi roumem ze skelných vláken, které těsně přiléhá na jednotlivé mřížky. A právě v tomto skelném rounu je nasáklý elektrolyt – roztok kyseliny sírové. Výhodou tohoto typu separátoru je vynikající iontová vodivost, umožňující



Obrázek 7.: Bezúdržbový solární AGM akumulátor

rychlý průnik plynů a tím účinnou rekombinaci plynů na elektrodách článků, což vysvětluje výbornou schopnost vázat elektrolyt bez potřeby jeho doplňování o destilovanou vodu. Případné přetlaky plynů v akumulátoru jsou regulovány ventilem. Průměrný počet nabíjecích a vybíjecích cyklů je u AGM akumulátorů obvykle 1400 – 1700 cyklů se 40 % hloubkou vybíjení [9]. Příklad AGM akumulátoru je uveden na obr. 7.



Obrázek 8.: Bezúdržbový solární gelový akumulátor

Gelové akumulátory mohou mít též mřížkové elektrody, nebo i pancéřové desky. Avšak elektrolyt je zde vázán ve formě tixotropního křemičitého gelu, který je obvykle aditivovaný dalšími prvky [7]. Mřížkové elektrody článků jsou konstruovány z olověného kompozitu dotovaného např. vápníkem. Toto uspořádání dotovaných elektrod a vhodného gelového elektrolytu opět umožňuje rekombinaci plynů vznikajících při nabíjení na elektrodách podobně jako u AGM akumulátorů. Počet nabíjecích a vybíjecích cyklů je u gelových akumulátorů vyšší. Na obrázku 8. je uveden gelový akumulátor firmy Hoppecke [10], s životností až 2000 cyklů při hloubce vybíjení od 40 do 50 %. Jak akumulátory gelové, tak AGM mohou být provozovány v libovolné poloze.

3 Solární nabíjecí regulátory pro ostrovní systémy

Jak již bylo naznačeno v úvodu, tak má diplomové práce je zaměřena na problematiku FV dobíjecích regulátorů používaných v ostrovních systémech. Než se však začneme zabývat návrhem a případnou realizací konkrétních regulátorů, je nutné se zprvu seznámit s funkcemi a možnostmi běžně dostupných regulátorů.

Regulátory nabíjení tvoří hlavní spojovací článek mezi solárním generátorem, resp. fotovoltaickými panely, akumulátorem a spotřebičem [1]. Regulátory lze klasifikovat zejména z hlediska systémového napětí, na které jsou určeny (12 V, 24 V), dále také z hlediska maximálního vstupního a výstupního proudu, se kterým regulátor dokáže pracovat a neposlední řadě též z hlediska principu regulace výkonu – PWM a MPPT viz dále. Hlavním úkolem regulátoru je především optimalizace řízení celého procesu nabíjení a vybíjení. Toto řízení spočívá v podstatě v následujících úkolech:

1. Zajistit optimální nabíjení tak, aby se dosáhlo co nejdelší životnosti akumulátoru. Tato schopnost je podmíněna tím, že FV dobíjecí regulátor musí při dosažení koncového nabíjecího napětí akumulátoru buď odpojit fotovoltaické panely od akumulátoru, nebo výstupní nabíjecí napětí po určitý časový interval vhodně omezit na hodnotu napětí, které je přípustné pro daný typ akumulátoru tak, aby nedocházelo k nežádoucímu přebíjení.
2. Zabránit vybíjení akumulátoru přes solární generátor. Při nedostatečné intenzitě slunečního záření například při zatažené obloze či v noci se FV panely v důsledku poklesu svého vnitřního odporu chovají jako spotřebiče a bez určitých opatření by se přes ně akumulátor vybíjel. Proto regulátor musí také dokázat zabránit „zpětnému toku elektrického proudu“ z akumulátoru zpět do fotovoltaických panelů.
3. Chránit akumulátor před hlubokým vybitím a to následujícím způsobem. Dojde-li při vybíjení k poklesu napětí akumulátoru pod mezní hodnotu koncového vybíjecího napětí, což je příznak úplného vybití AKU, musí regulátor dokázat odpojit spotřebiče od akumulátoru, čímž zabrání dalšímu vybíjení, které by jinak vedlo k poškození akumulátoru hlubokým vybitím.

Pro dlouhou životnost akumulátoru má dobré řízení nabíjení a zejména dobrá ochrana před hlubokým vybitím rozhodující význam. Protože obojí závisí na přesném zjišťování stavu nabití akumulátoru, jsou k tomu dnes moderní fotovoltaické nabíjecí regulátory vybaveny mikroprocesory. Kromě řízení nabíjení mohou regulátory nabíjení plnit ještě další funkce, které jsou jen stručně uvedeny v následujících podkapitolách.

3.1 Přizpůsobení regulátoru na systémové napětí

Ostrovní fotovoltaické systémy se v praxi nejčastěji realizují obvykle na dvě systémová napětí, a sice na 12 V a 24 V. Je to dáno především použitým typem fotovoltaických panelů, které jsou zpravidla 36-ti článkové pro systémy na 12 V, nebo 72-ti článkové pro systémy na 24 V. Systémové napětí je jinými slovy napětí, ve kterém se provozuje celý ostrovní FV systém, což je spojeno i s použitím adekvátního typu akumulátoru včetně spotřebičů na stejnosměrné napětí. Většina současných solárních dobíjecích regulátorů umožňuje automatické přizpůsobení instalovanému systémové napětí včetně nastavení mezních nabíjecích a vybíjecích napětí podle použitého akumulátoru. Některé "méně vyspělé" dobíjecí regulátory však vyžadují nastavení manuální [1]. Záměrně uvádím druhý termín v uvozovkách, protože jsou tyto typy regulátorů mnohdy mnohem užitečnější, protože umožňují libovolné uživatelské nastavení, takže jsou univerzálně použitelné pro nejrůznější variace akumulátoru, kdežto automatizované regulátory řízené mikroprocesory jsou vždy limitovány určitým programovým nastavením mikročipů, tudíž musí uživatel spoléhat na to, že výrobce správně nastavil a naprogramoval regulátor pro dané akumulátory či další aplikace.

3.2 Ochranné funkce regulátoru

Mnoho současných dobíjecích regulátorů má též implementovány ochranné obvody, které hlídají maximální vstupní proud FV panelů, maximální výstupní proud do spotřebičů, napětí akumulátoru, či teplotu regulátoru. Dojde-li například k tomu, že výstupní proud do spotřebiče převyší určitou mezní hodnotu (zkrat), odpojí regulátor spotřebič od akumulátoru a zabrání tak poškození způsobené nadměrným proudem. Součástí bývá i ochrana proti přepólování.

3.3 Indikace pracovních stavů při řízení provozu

Jistě velmi důležitou funkcí při řízení provozu je také předběžné varování regulátoru předtím, než zareaguje ochrana před hlubokým vybitím, když je v akumulátoru k dispozici ještě malé množství energie [1]. Uživatel může tak svou spotřebu energie včas snížit a zabránit tak odpojení zátěže, které by jinak bylo nutné. Jednoduchým ukazatelem předběžného varování před hlubokým vybitím je indikace zjišťovaného stavu nabití buďto pomocí LED-diod, popřípadě displeje LCD. U velkých zařízení je možno pro nepřetržitou kontrolu připojit nabíjecí regulátor na PC.

3.4 Optimalizace řízení procesu nabíjení a vybíjení

Současné dobíjecí regulátory lze rozdělit podle principu regulace výkonu z FV panelů na regulátory PWM a regulátory MPPT. První skupina regulátorů reguluje výkon v nespojitém režimu na principu pulsně šířkové modulace (PWM = Pulse Width Modulation). Princip PWM regulátorů bude popsán v následujících kapitolách. Druhá skupina regulátorů (viz. obr.9.) pracující v režimu MPPT provádí neustálé sledování bodu maximálního pracovního výkonu FV panelů (Maximum Power Point Tracking), podle čehož tyto regulátory upravují energii z FV panelů tak, aby nabíjení akumulátorů bylo co možná nejefektivnější s minimálními ztrátami. Tento způsob regulace se využívá spíše pro FV instalace nad 200 W, pro menší instalované výkony se používá jen zřídka.



Obrázek 9.: Solární nabíjecí regulátor MPPT

S optimalizací nabíjecího procesu souvisí též regulace nabíjení v závislosti na teplotě akumulátoru, která ovlivňuje jak koncové nabíjecí napětí, tak koncové vybíjecí napětí. Proto některé solární regulátory umožňují také kompenzaci nabíjecí a vybíjecí charakteristiky v závislosti na teplotě akumulátoru. Tato funkce též výrazně přispívá k životnosti akumulátoru.

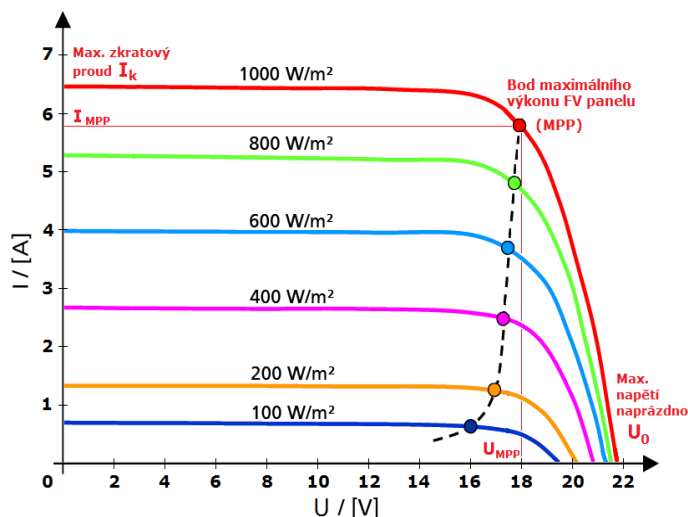
Z výše uvedených informací je zřejmé, že optimalizace celého řízení nabíjecího a vybíjecího procesu hraje klíčovou roli v efektivitě celého ostrovního FV systému. Důležité je však také zvolit vhodný princip nabíjení (viz dále).

3.5 Základní principy nabíjení FV regulátorů

Mezi základní principy nabíjení FV regulátorů patří zejména nabíjení konstantním napětím, konstantním proudem, popřípadě kombinací těchto způsobů [11]. Je třeba upozornit na fakt, že termín "konstantní" zde nelze brát naprosto doslovně, neboť tento termín plně platí v případě nabíjení akumulátoru z tvrdého zdroje. V případě solárních aplikací je však jak elektrický proud, tak napětí závislé na aktuální intenzitě osvětlení FV panelů. Proto je nutné v obou případech nabíjení vycházet z voltampérové charakteristiky daného FV panelu. Na obrázku 10. je uvedena V-A charakteristika FV panelu 12V/100W na bázi monokrystalického křemíku při různých intenzitách osvětlení. Přesné parametry tohoto FV panelu jsou v pramenu [12].

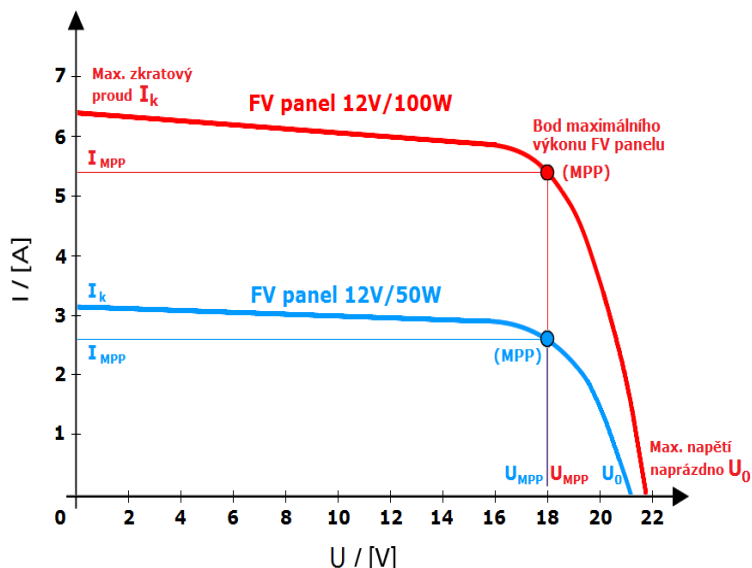
Z uvedené charakteristiky je patrný maximální proud nakrátko ($I_k = 6.5 \text{ A}$) a napětí naprázdno ($U_0 = 21,9 \text{ V}$), které dokáže FV panel vyprodukovat při maximálním možném osvětlení bez připojené zátěže. Při zatížení FV panelu samozřejmě tyto hodnoty

výrazně poklesnou. Hodnoty I_{MPP} a U_{MPP} udávají velikosti napětí a proudu příslušející bodu maximálního výkonu FV panelu (MPP = 100 % výkonu = 100 W). Jak je vidět, tak FV panely dovedou poskytovat pro nabíjení akumulátorů dostatečné napětí při různých denních intenzitách osvětlení, kdežto jejich výstupní proudy jsou však touto intenzitou dopadajícího slunečního záření limitovány.



Obrázek 10.: Volt-ampérové charakteristiky FV panelu 12V/100W (Monocrystal Si) při různých intenzitách osvětlení

V reálném případě je výstupní proud z FV panelů přibližně lineárně závislý na

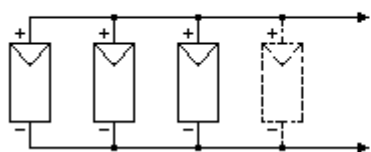


Obrázek 11.: Porovnání V-A charakteristik dvou FV panelů:
FV panel 12/100W × FV panel 12/50W

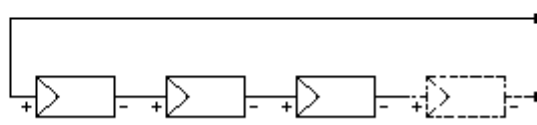
intenzitě osvětlení, zatímco výstupní napětí je závislé logaritmicky [11]. Tato skutečnost je příznivá spíše pro nabíjení konstantním napětím. Pro nabíjení konstantním proudem z důvodu dosažení potřebné velikosti nabíjecího proudu je proto nutné zvolit FV panel o dostatečném

výkonu (viz. obr.11.), nebo použít více panelů o stejném výkonu a vhodně je zapojit. V praxi se běžně FV panely zapojují buď sériově (za sebou) k dosažení požadovaného napětí, či paralelně (vedle sebe) k získání potřebného proudu (viz. obr.12).

Paralelní spojování FV panelů k získání potřebného proudu



Sériové spojování FV panelů k získání potřebného napětí



Obrázek 12.: Spojování FV panelů za účelem dosažení potřebného proudu / napětí

Pro návrh jakéhokoliv FV systémů je znalost parametrů a možností FV panelů nepostradatelná. V praxi se při návrhu ostrovního systému zvažuje četnost využívání a požadovaná spotřeba energie, podle čehož se volí vhodný typ akumulátoru o adekvátní kapacitě, kterému se musí přizpůsobit i instalovaný výkon FV panelů. Důležité je též zvolit i vhodný princip nabíjení viz dále.

Ať už se k nabíjení použije jakýkoliv princip, vždy je třeba respektovat parametry použitého akumulátoru, zejména jeho mezní napětí v nabitém a vybitém stavu, aby nedocházelo k nežádoucímu přebíjení či hlubokému vybíjení.

3.5.1 Nabíjení konstantním proudem

Z uvedených V-A charakteristik FV panelů vyplývá, že fotovoltaický panel můžeme za příznivých podmínek, kdy je intenzita slunečního záření optimální, považovat za dobrý zdroj, kde maximální hodnota výstupního elektrického proudu je určena osvětlením FV panelu [11]. Regulátory nabíjejí principem konstantního proudu obvykle umožňují nastavení výstupní konstantní velikosti proudu, která je v průběhu nabíjení neměnná, přičemž se při nabíjení postupně zvyšuje napětí akumulátoru [5]. Doporučené nabíjecí hodnoty proudů jsou obvykle stanoveny výrobcem akumulátoru. Pokud ne, používá se často pravidlo, že velikost dobíjecího konstantního proudu by měla přibližně odpovídat jedné desetíně kapacity akumulátoru (např. pro akumulátor o kapacitě 100 Ah by byl optimální dobíjecí proud 10 A). Při tomto principu nabíjení je však nutné, pečlivě měřit čas dobíjení, nebo pozorně monitorovat koncové nabíjecí napětí akumulátoru a akumulátor při dosažení nabitého stavu včas odpojit, popřípadě omezit nabíjecí proud na tzv. *udržovací hodnotu*, aby nedocházelo k nadměrnému přebíjení, které by jinak vedlo k poškození až zničení akumulátoru. Současné regulátory, které pracují na principu dobíjení konstantním proudem, jsou však dnes vybaveny integrovanými obvody popřípadě mikroprocesory, které plně automatizují a hlídají nabíjecí proces. Nevýhodou tohoto principu je poměrně značná doba nabíjení, kterou lze částečně kompenzovat přepínáním velikostí nabíjecích proudů (např. dvoustupňové nabíjení). Více informací o popisovaném nabíjecím principu je k nalezení v pramenu [5].

Nabíjení konstantním proudem je vhodné především pro FV systémové aplikace s velkým odběrem elektrického proudu, kde akumulátor bývá značně vybit v době mezi dostatečnou intenzitou slunečního záření pro nabíjení (tj. v noci či během zatažených dní) a během slunečních dní bývá nabíjen po většinu doby [11]. To znamená, že většinou nebývá v režimu udržovacího nabíjení. V praxi je však často žádané, aby akumulátor vždy disponoval určitým množstvím energie, které by bylo možné kdykoliv odebrat. Pro tento účel jsou však výhodnější regulátory pracující na principu nabíjení konstantním napětím.

3.5.2 Nabíjení konstantním napětím

Princip nabíjení konstantním napětím je naprosto odlišný od předchozího způsobu právě v tom, že konstantní veličinou je nyní výstupní napětí regulátoru, přičemž se v průběhu nabíjení mění velikost proudu. Regulátory pak ve své podstatě pracují jako zpětnovazební stabilizátory napětí, které jsou schopné dodat do akumulátoru maximální nabíjecí proud v závislosti na intenzitě osvětlení FV panelů [11]. Účinnost nabíjení je v tomto případě poměrně vysoká, protože FV panely dovedou generovat dostatečné nabíjecí napětí při různých intenzitách slunečního záření. V praxi toto vypadá následovně. Velikost konstantního nabíjecího napětí regulátoru je nutné správně nastavit na velikost koncového nabíjecího napětí daného typu akumulátoru (tzv. plynovací napětí o velikosti např. 13,8 V až 14,4 V). Po připojení vybitého akumulátoru dodává nabíjecí regulátor, maximální dobíjecí proud v závislosti na intenzitě osvětlení, což způsobuje rychlé ohřátí elektrolytu. S rostoucím stupněm nabití akumulátoru roste i jeho napětí, a tím se zmenšuje rozdíl potenciálů mezi akumulátorem a konstantním výstupním napětím regulátoru, což má za následek postupné snižování nabíjecího proudu. Konečný nabíjecí proud pak dosahuje velikosti o několik řádů nižší než je velikost počátečního nabíjecího proudu.

Tento způsob nabíjení je vhodný především pro aplikace, kde je odběr energie z akumulátorů jen občasný či krátkodobý a je potřeba mít akumulátor pokud možno stále nabitý. Díky stabilizaci nabíjecího napětí na konstantní hodnotě, která odpovídá plně nabitému akumulátoru určitého typu, nemůže docházet k nežádoucímu přebíjení ani při dlouhodobém připojení akumulátoru. Zároveň snižující se hodnota proudu v konečných nabíjecích fázích je pro olověné akumulátory výhodná s ohledem na jejich životnost.

Velikou předností tohoto principu nabíjení je bezesporu to, že v důsledku nabíjení maximálním možným proudem dodávaným z FV panelů v počáteční fázi, je akumulátor nabit na cca 80 % za relativně krátkou dobu. Nevýhodou jsou naopak energetické ztráty na regulátoru, které snižují účinnost FV systému. A právě tato problematika bude detailněji řešena při návrhu regulátorů v následujících kapitolách.

4 Vlastní návrhy nabíjecích regulátory pro ostrovní systémy

V následujících kapitolách jsou popsány vlastní návrhy obvodů FV regulátorů pracujících na principu nabíjení konstantním napětím. Tento způsob nabíjení byl zvolen proto, že bylo záměrem této diplomové práce vytvořit jednoduchý, snadno nastavitelný a též snadno opravitelný regulátor, který by umožňoval rychle a efektivně nabíjet různé typy akumulátorů tak, aby bylo možné používat naakumulovanou energii prakticky kdykoliv. První dva uvedené návrhy regulátorů pracují na bázi lineární stabilizace napětí. Zbývající dva regulátory jsou však koncipovány v duchu spínaných zpětnovazebních stabilizátorů napětí pracujících v pulsním módu (PWM).

4.1 FV nabíjecí regulátor se stabilizátorem napětí LM317

4.1.1 Popis FV regulátoru se stabilizátorem LM317

Koncepce tohoto FV nabíjecího regulátoru byla převzata z mé bakalářské práce [13]. Protože se tento elektrický obvod osvědčil, a zároveň byl jeho princip použit i u druhého FV regulátoru (viz kapitola 4.2), figuruje i v mé diplomové práci, přičemž je jen stručně popsán.

Jednoduchý fotovoltaický nabíjecí regulátor se stabilizátorem LM317 slouží k nabíjení akumulátorů konstantním napětím, které lze jednoduše nastavit, tudíž je regulátor vhodný pro různé varianty akumulátorů s adekvátními parametry. Elektrický obvod popisovaného FV regulátoru se skládá v podstatě ze dvou základních částí. První část slouží k nabíjení akumulátoru a v případě plného dobití AKU poskytuje též udržovací režim nabíjení. Druhá část představuje poloautomatizovaný, nastavitelný odpojovač zátěže, který v případě vybití akumulátoru automaticky odpojí zátěž, resp. spotřebiče, čímž chrání akumulátor proti nežádoucímu hlubokému vybíjení. Opětovné připojení zátěže je nutné u tohoto regulátoru provést manuálně. Připojení zátěže regulátor umožní jen v případě, že se napětí akumulátoru opětovným nabíjením zvýšilo nad nastavenou úroveň odpojovacího napětí.

Srdcem tohoto nabíjecího regulátoru je lineární regulovatelný napěťový stabilizátor LM317TS, který je proudově posílen a dále doplněn dalšími součástkami podle doporučeného zapojení - viz. katalogový list výrobce [15]. Integrovaný obvod LM358 obsahuje dva nízkopříkonné operační zesilovače, které jsou zapojené jako komparátory a slouží k indikaci pracovních stavů. Integrovaný obvod LM311 představuje řídicí část odpojovače, jenž plní ochrannou funkci. Více informací týkajících se podrobného popisu jednotlivých obvodových prvků včetně správného nastavení tohoto obvodu je uvedeno v pramenu [13].

4.1.2 Specifikace FV regulátoru se stabilizátorem LM317

- Maximální vstupní napětí ($FV_{\text{panel}} - U_{\text{max}}$) – 35 V
- Maximální vstupní proud (z FV panelu - I_{max}) – 3 A
- Proudový odběr regulátoru – do 15 mA (při 12 V, klidový stav)
- Nastavitelné nabíjecí / výstupní napětí regulátoru – 10 ÷ 15 V
- Maximální výstupní proud (dáno použitou pojistkou F1) – 10 A
- Maximální zátěž na výstupu regulátoru – do 120 W
- Nastavitelné odpojení zátěže při nízkém napětí AKU - 8 ÷ 11 V
- Funkce připojení / odpojení zátěže od regulátoru a AKU
- Indikace napětí na FV panelu (nad 17 V)
- Indikace nabíjení akumulátoru - nastavitelná
- Indikace připojení / odpojení zátěže
- Ochrana proti nadměrnému přebíjení akumulátoru
- Ochrana proti hlubokému vybití akumulátoru
- Ochrana proti zkratu na výstupu regulátoru pojistkou F1

4.1.4 Zhodnocení FV regulátoru se stabilizátorem LM317

Co se konstrukce týče, bylo přihlédnuto k běžně dostupným součástkám. Hlavní předností tohoto regulátoru je jednoduchost uspořádání a funkce celého zapojení. Nevýhodou tohoto FV regulátoru jsou výkonové ztráty energie (ve formě tepla), které vznikají v důsledku lineární regulace napětí na akčních členech tohoto regulátoru, a sice na tranzistoru T1 a stabilizátoru LM317, ale také na Schottkyho diodě D3. Proto je nutné v případě realizace obvodu opatřit zmíněné součástky dostatečně dimenzovanými hliníkovými chladiči, aby nedošlo k jejich poškození při nabíjení vybitého akumulátoru, kdy je nabíjecí proud maximální. Drobný nedostatek představuje ochrana proti zkratu na výstupu regulátoru klasickou tavnou pojistkou, čímž je ohrožen tranzistor T1 a další součástky. Tavná pojistka je mnohdy pomalá. Efektivnější by bylo doplnit zapojení o elektronickou pojistku, která je mnohonásobně rychlejší.

4.2 FV regulátor se stabilizátorem LM317 a procesorem PIC12F675

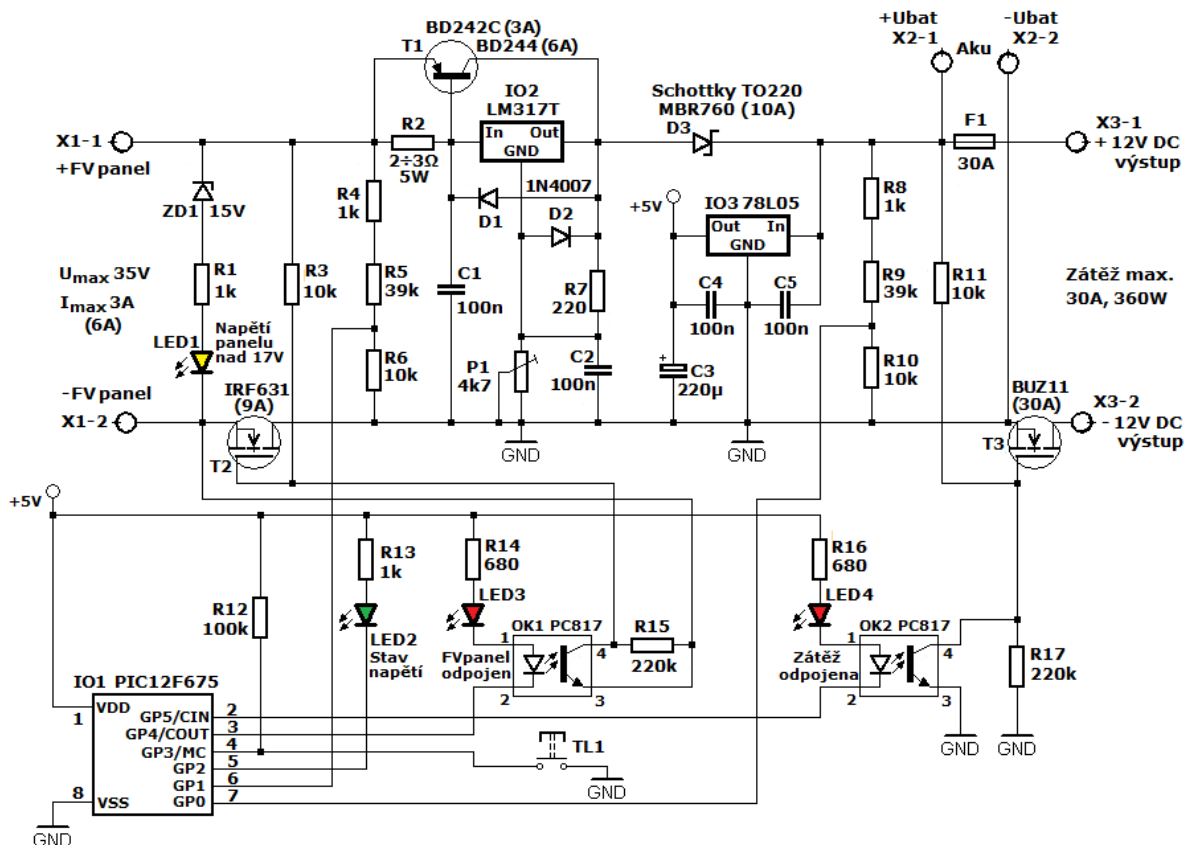
4.2.1 Popis FV regulátoru s integrovanými obvody LM317 a PIC12F675

Tento FV regulátor vychází se stejného nabíjecího principu jako předchozí regulátor, poněvadž opět využívá osvědčený integrovaný stabilizátor napětí LM317, který je opět posílen výkonovým tranzistorem. Rozdíl je především v tom, že obvod regulátoru obsahuje tentokrát procesor PIC, který hlídá nabíjecí proces, respektive celý chod FV regulátoru namísto několika předešle použitých komparátorů, čímž značně zefektivňuje celou funkci FV regulátoru. Jednou z hlavních předností procesoru PIC je též funkce odpojení zátěže při nízkém napětí akumulátoru, ale navíc také funkce odpojení FV panelu od regulátoru v případě zničení stabilizátoru LM317, čímž je chráněn jak akumulátor, tak i ostatní součásti v obvodu regulátoru. Procesor PIC umožňuje mimo jiné též indikaci provozních stavů, které má naprogramované. Je třeba zmínit, že elektronická koncepce tohoto obvodu vychází ze zapojení, které bylo uvedeno v pramenu [14]. Nicméně byl tento obvod nepatrně upraven a doplněn.

4.2.2 Specifikace FV regulátoru s integrovanými obvody LM317 a PIC12F675

- Maximální vstupní napětí ($FV_{\text{panel}} - U_{\text{max}}$) – 35 V
- Maximální vstupní proud (z FV panelu - I_{max}) – 3 / 6 A
- Proudový odběr regulátoru – do 10 mA (při 12 V, klidový stav)
- Nastavitelné nabíjecí (popř. napájecí) napětí regulátoru – 10 ÷ 15 V
- Maximální výstupní proud (dáno použitou pojistkou F1) – 30 A
- Maximální zátěž na výstupu regulátoru – do 360 W
- Automatické odpojení ($U < 11,0$ V na AKU)/připojení ($U > 12,2$ V) zátěže
- Auto. odpojení ($U > 14,5$ V za LM317)/připojení ($U < 14,0$ V) FV panelu
- Indikace napětí na FV panelu (nad 17 V)
- Indikace provozních stavů regulátoru
- Indikace napětí na akumulátoru – stav nabití
- Ochrana proti nadměrnému přebíjení akumulátoru
- Ochrana proti hlubokému vybití akumulátoru
- Ochrana proti zničení AKU při porušení stabilizátoru

4.2.3 Schéma zapojení FV regulátoru s IO LM317 a PIC12F675



4.2.4 Zapojení a princip činnosti FV regulátoru s IO LM317 a PIC12F675

Základem regulátoru je opět napěťový stabilizátor LM317TS (IO2) a nově 8bitový řídicí mikrokontrolér PIC12F675 (IO1). Pro napěťový stabilizátor bylo použito základní doporučené zapojení od výrobce podle katalogového listu[15].

Konstantní nabíjecí napětí se nastavuje odporovým trimrem P1. Průběh nabíjení je identický s předchozím případem, takže je ošetřen i případ dlouhodobého připojení akumulátoru k regulátoru, při kterém nedochází k nežádoucímu nadměrnému přebíjení akumulátoru [13]. Stabilizátor LM317 je opět proudově posílen výkonovým tranzistorem T1 typu PNP, který se začíná otevírat při větším úbytku napětí na čtecím rezistoru R2, jenž je vyvolán větším nabíjecím proudem. Při proudu větším než 1 A teče stabilizátorem jen malá část proudu a většina teče přes tranzistor T1. Tranzistor BD242 je možné použít pro maximální nabíjecí proud 3 A (BD244 pro proud až 6 A). Opět zde platí, že při větších nabíjecích proudech je nutné opatřit regulátor napětí LM317, výkonový tranzistor T1 a Schottkyho diodu D3 adekvátním pasivním ALU chladičem.

Diody D1 a D2 u stabilizátoru slouží jako ochrana proti poškození IO při vybíjení blokovacích kondenzátorů do vývodů stabilizátoru. Blokovací kondenzátory slouží jako ochrana proti krátkodobým náhodným napěťovým špičkám. Sériové spojení Zenerovy diody ZD1, rezistoru R1 a diody LED1 tvoří osvědčenou indikaci dostatečného nabíjecího napětí na FV panelu jako v předešlém případě. LED začne svítit při napětí asi 17 V na výstupu z FV panelu.

Schottkyho dioda D3 představuje ochranu proti nežádoucímu vybíjení akumulátoru zpět do fotovoltaického panelu, ke kterému by došlo při poklesu napětí na FV panelu vlivem nedostatečného osvětlení. Podrobnější specifikace této funkce je uvedena v pramenu [13].

Dalším prvkem obvodu je monolitický integrovaný stabilizátor 78L05 (IO3), který je doplněn filtračními kondenzátory C3, C4 a C5. Stabilizátor je zapojen podle katalogového listu [16]. Obvod 78L05 je napájen přímo ze strany akumulátoru a na svém výstupu vytváří konstantní napětí 5 V, které je určeno k napájení mikroprocesoru PIC12F675.

Ostatní prvky FV regulátoru náleží procesoru PIC, který hlídá nabíjecí proces, respektive celý chod FV regulátoru. Funkci mikroprocesoru včetně ostatních součástí popisují následující podkapitoly.

4.2.5 Funkce mikrokontroléru PIC12F675

Funkce mikroprocesoru PIC12F675 je založena na neustálém monitorování napětí jednak fotovoltaického panelu, ale i napětí, které je na akumulátoru. Napětí na FV panelu i na akumulátoru jsou měřena 10-ti bitovým A/D převodníkem integrovaným v mikroprocesoru PIC. Vstup převodníku je programem přepínán mezi piny GP0 a GP1. Pro monitorování důležitých napětí na regulátoru bylo zvoleno pouze 8bitové rozlišení A/D převodníku, přesnost je však i tak dostatečná.

Napětí měřené na akumulátoru je vhodně rozděleno napěťovým děličem, jenž je tvořen rezistory R8, R9 a R10, a jeho poměrná část je přivedena na vstup mikroprocesoru GP0. Měření napětí FV panelu je realizované stejným způsobem. Na napěťovém děliči s rezistory R4, R5 a R6 se opět vhodně rozdělí napětí FV panelu, přičemž je jeho poměrná část přivedena na vstup GP1. Maximální vstupní měřené napětí obou děličů je 35,5 V. Rozlišení A/D převodníků je pak 100mV/bit. Přesnost (tolerance) rezistorů v děličích by pro přesné měření měla být co nejlepší.

FV regulátor umožňuje pracovat ve dvou módech. Základní mód regulátoru je AUTOMAT a druhý mód je MANUAL. Po připojení napětí, ať již ze strany FV panelu nebo akumulátoru, přejde regulátor okamžitě do módu *automat*. Mód *manual* se na FV regulátoru aktivuje déle trvajícím stiskem (déle než 3s) tlačítka TL1 (Volba).

Pracuje-li regulátor v módu *automat*, měří automaticky napětí akumulátoru a FV panelu. Naměřené údaje regulátor vyhodnocuje a případně spíná nebo odpojuje zátěž akumulátoru či fotovoltaický panel od regulátoru. Sepnutí či odepnutí FV panelu a zátěže je indikováno LED-diodami LED3 a LED4. Stav napětí akumulátoru a FV panelu je možné indikovat LED-diodou LED2 s malým příkonem, která je připojena na pin GP2. Standardně však tato signalizační LED-dioda LED2 zobrazuje jen napětí akumulátoru, protože napětí FV panelu se vlivem nestálé intenzity záření mění. Indikace napětí FV panelu má smysl jen v případě, kdy se intenzita slunečního záření mění jen nepatrně, například při jasné obloze, tudíž napětí na FV panelu příliš nekolísá. Pro indikaci napětí na FV panelu je nutné přepnutí viz. dále.

Napětí akumulátoru je v různých verzích firmware (programové vybavení procesoru PIC) indikováno odlišným způsobem. Ve verzích firmwaru v1.0, v1.1 a v1.3 je použito tříbodové zobrazení napětí. Bliká-li indikační LED-dioda LED2 s intervalem 0,5 s (0,5 s svítí a 0,5 s nesvítí), je napětí akumulátoru menší než 11,5 V (akumulátor je vybitý). Bliká-li indikační LED2 s intervalem 1 s (0,8 s svítí, 0,2 s nesvítí), je napětí akumulátoru v rozmezí 11,5 až 13,5 V (akumulátor je v pořádku). Svítí-li indikační LED-dioda LED2 trvale, je napětí akumulátoru větší než 13,5 V a akumulátor je nabit. Ve verzích firmwaru v1.2 a v1.4 je použito pětibodové zobrazení napětí. Bližší popis rozdílu je v textovém souboru o firmware, který je elektronickou přílohou k mé diplomové práci.

Napětí FV panelu je možné indikovat po krátkém stisknutí tlačítka TL1 (do 3 s). Velikost napětí je zobrazena počtem bliknutí indikační LED2. Napětí je indikováno přibližně s rozdělením po 1 V, jinak řečeno počet bliknutí LED2 je přímo úměrný změřenému napětí:

- 0 až 0,9 V – 0×bliknutí LED,
- 1 až 1,9 V – 1×bliknutí LED,
- 2 až 2,9 V – 2×bliknutí LED,
- 3 až 3,9 V – 3×bliknutí LED,
- 4 až 4,9 V – 4×bliknutí LED,
- 5 až 5,9 V – 5×bliknutí LED, atd.

4.2.6 Funkce automatického odpojení a připojení zátěže

Pokud je akumulátor dostatečně nabitý, je přivedeno kladné napětí tvořeno děličem R11 a R17 na řídicí elektrodu tranzistoru T3 typu MOSFET (BUZ11), které ho udržuje v otevřeném stavu a z výstupu je možné napájet zátěž o maximálním příkonu 360 W (dáno akumulátorem, tranzistorem T3 BUZ11 a použitou tavnou pojistkou F1 – max. 30 A). Zmenší-li se napětí akumulátoru pod 11,0 V, je spuštěn časovač. Je-li po uplynutí 1 minuty stále napětí akumulátoru menší než 11,0 V, je odpojena zátěž následujícím způsobem. Mikroprocesor PIC sepne větev tvořenou rezistorem R16, LED-diodou LED4 a optočlenem OK2PC817, která je připojená k vývodu GP5/CIN. Tím je řídicí elektroda tranzistoru T3 (BUZ11) uzemněna a tranzistor T3 se zavře, čímž odpojí zátěž.

Zátěž je opět připojena, zvětší-li se opětovným nabíjením napětí akumulátoru nad 12,2 V a také je-li zároveň splněná časová podmínka 1 minuta. V tomto čase musí být napětí akumulátoru stále větší než 12,2 V. Tímto způsobem je řešena ochrana proti hlubokému vybití akumulátoru. Toto nastavení je použito ve verzích firmwaru v1.0, v1.1 a v1.2. Ve verzích v1.3 a v1.4 je použito jiné nastavení (viz. textový soubor u firmware v elektronické příloze k DP).

4.2.7 Funkce automatického odpojení a připojení FV panelu

Tato funkce odpojí FV panel od regulátoru včetně akumulátoru v případě, že se vyskytne porucha na stabilizátoru LM317, nebo na tranzistoru T1, či na Schottkyho diodě D3, což by způsobilo náhlé zvětšení napětí nad úroveň pro bezpečné nabíjení akumulátoru. Za normálních podmínek je výstupní nabíjecí napětí nastaveno na požadovanou úroveň a na hradlo tranzistoru T2 (IRF631) je z napěťového děliče tvořeného rezistory R3 a R15 přivedeno kladné napětí, které jej opět udržuje v otevřeném stavu. Zvětší-li se napětí za regulátorem LM317 a Schottkyho diodou D3 nad 14,5 V, je okamžitě odpojen FV panel a to obdobným způsobem jako u odpojení zátěže, přičemž se sepne větev tvořená rezistorem R14, LED-diodou LED3 a optočlenem OK1PC817, která je připojená k vývodu GP4/COUT procesoru PIC. Panel je opět připojen, zmenší-li se napětí na straně AKU pod 14,0 V a je splněna časová podmínka 5 minut. Tato funkce chrání akumulátor proti nadměrnému přebíjení s možným následkem jeho zničení.

Regulátor může pracovat i v módu *manual*, který umožňuje libovolně odpojit a připojit zátěž podle potřeby. Regulátor standardně pracuje v módu *automat*, ve kterém funguje podle předchozího popisu. Po stisku tlačítka TL1 (Volba) na dobu delší než 3 s (čas je počítán, až když zhasne indikační LED) se přepne regulátor do módu *manual*. Tento mód je indikován trojnásobným rychlým bliknutím indikační LED2. V tomto módu je možné pouze krátkým stiskem tlačítka TL1 střídat připojit a odpojit zátěž k akumulátoru. Ostatní funkce jsou potlačeny. Pro zpětné přepnutí z módu *manual* do módu *automat* je nutné stisknout tlačítko TL1 na dobu delší než 3 s. Poté je již regulátor opět v režimu *automat*, kde jsou již měřena, hlídána a indikována všechna napětí.

Upozornění: Mód *manual* je určený především pro krátkodobé použití při téměř vybitém akumulátoru, například když potřebujeme na chvíli z akumulátoru napájet určitý spotřebič a zátěž již byla automaticky odpojena vlivem dosažení napěťové úrovně, jenž přísluší vybitému akumulátoru. V tomto režimu se může vlivem přílišného vybití akumulátor poškodit nebo i dokonce zničit. Proto je nutné častěji sledovat napětí akumulátoru, nejlépe připojeným externím voltmetrem, popřípadě vhodným indikátorem napětí. Správně by napětí 12-ti voltového olověného akumulátoru nemělo poklesnout pod napěťovou úroveň 10,5 V. Z výše uvedeného důvodu je v tomto módu naprogramována pojistka proti zničení akumulátoru přílišným vybitím. Zmenší-li se napětí akumulátoru pod 10,4 V a setrvá na této úrovni déle než 30 s, je trvale odpojena zátěž bez ohledu na stisk tlačítka. Zátěž je opět připojena pouze v *automatickém* režimu, zvětší-li se napětí k hranici pro opětovné připojení zátěže a je splněna časová podmínka.

4.2.8 Nastavení FV regulátoru s integrovanými obvody LM317 a PIC12F675

Pro správnou funkci regulátoru je opět nutné před prvním připojením akumulátoru a zátěže správně nastavit výstupní napětí ze stabilizátoru LM317. Nastavení je podobné jako u předešlého typu FV regulátoru. Na svorky „X1“ připojíme místo FV panelu stabilizovaný SS zdroj, na kterém nastavíme napětí v rozmezí 17 až 35 V. Na svorky pro AKU „X2“ připojíme voltmetr a odporovým trimrem P1 nastavíme požadované nabíjecí výstupní napětí v rozmezí 13,8 až 14,2 V (opět podle typu AKU). Při tomto nastavování není vhodné osazovat mikroprocesor PIC do patice, protože je velmi pravděpodobné, že před nastavením bude napětí za stabilizátorem LM317 větší než 14,5 V, přičemž by se automaticky odpojil FV panel a až po 5 minutách by se opět automaticky připojil. Celý cyklus s odpojením a připojením se může opakovat, až to do doby, než bude napětí za regulátorem LM317 menší než 14 V. Proto je důležité, aby se napřed nastavilo správné nabíjecí napětí a poté je již možné bez problémů osadit naprogramovaný mikroprocesor PIC12F675 do patice.

4.2.9 Zhodnocení FV regulátoru napětí s obvody LM317 a PIC12F675

Z výše uvedeného vyplývají výhody této verze FV regulátoru spočívající v použití mikrokontroléru PIC, který plní ochranné a měřicí funkce regulátoru.

Jelikož se ale stále jedná o stejný nabíjecí princip (FV regulátor je též založen na funkci lineárního regulovatelného stabilizátoru napětí LM317), vznikají na některých obvodových prvcích regulátoru nežádoucí výkonové ztráty energie ve formě tepla (na tranzistoru T1, stabilizátoru LM317 a Schottkyho diodě D3). Stejně jako v předchozím případě je nutné opatřit zmíněné součástky dostatečně dimenzovanými ALU chladiči, aby nedošlo k jejich poškození při nabíjení vybitého akumulátoru, kdy je nabíjecí proud maximální.

Oba dva uvedené typy FV regulátorů pracují (za předpokladu správného nadimenzování nabíjecí soustavy) spolehlivě pro nabíjecí proudy do cca 2 A. Výše zmiňované ztráty se projevují při vyšších nabíjecích proudech a souvisejí s účinností lineárního principu regulace napětí. Mnohem lepších vlastností včetně účinnosti dosahují spínané zpětnovazební regulátory viz. dále.

4.3 FV regulátor napětí pracující v pulzním režimu (PWM)

4.3.1 Popis spínaného FV regulátoru

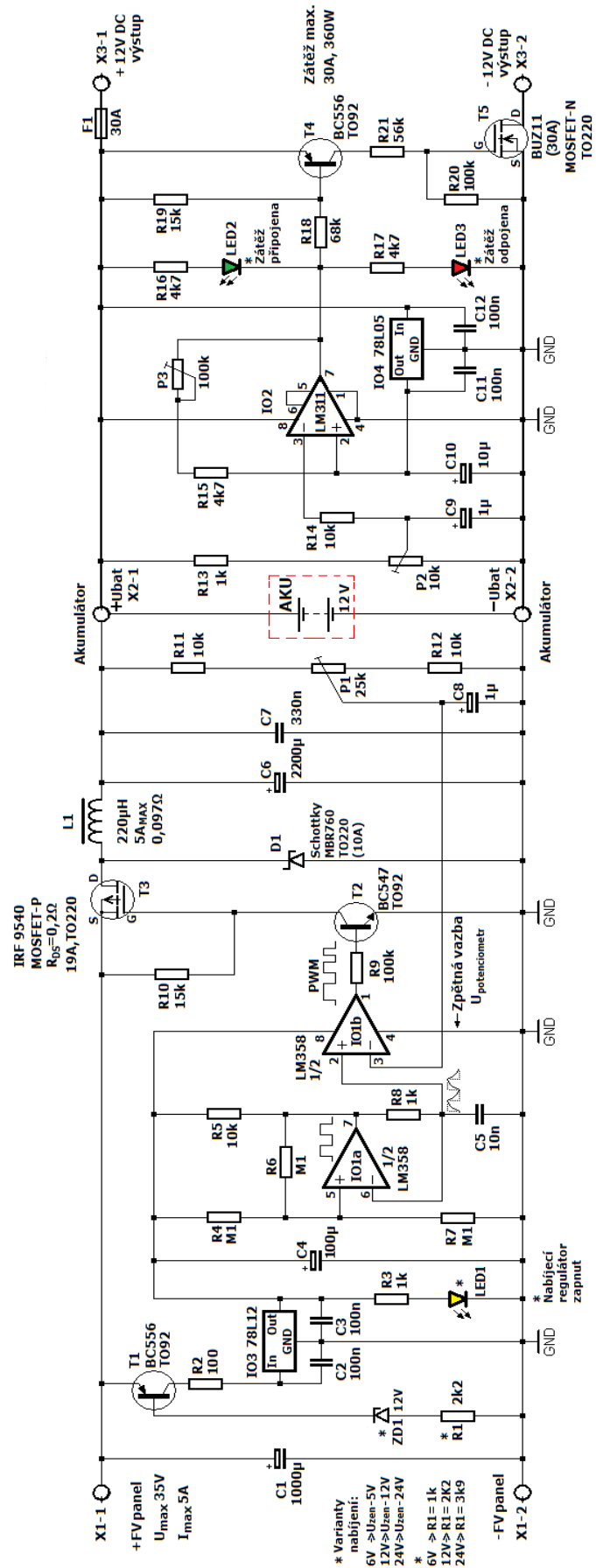
Oba předešlé návrhy FV regulátorů jsou sice svou konstrukcí jednoduché, spolehlivé a snadno obsluhovatelné. Nicméně pracují jako lineární zpětnovazební stabilizátory napětí, jejichž princip funkce spočívá v neustálém porovnávání výstupního napětí stabilizátoru s konstantním referenčním napětím, podle čehož následně upravují impedanci, resp. odpor sériově řazeného regulačního prvku (obvykle tranzistoru), čímž se mění i úbytek napětí na tomto sériovém akčním členu a tím dochází ke korekci výstupního napětí na požadovanou mez. Tento způsob regulace s sebou nese i nevýhodu, která spočívá ve ztrátě části energie regulovaného výkonu v podobě tepelné energie vyzářené regulačním prvkem.

Elegantnější způsob regulace umožňují spínané zpětnovazební regulátory, jejichž princip využívá následující FV regulátor pracující v pulzním módu. Oproti předešlým regulátorům se vyznačuje mnohem větší účinností regulace, i možností použití pro větší dobíjecí proudy. Samozřejmostí je též funkce ochrany proti přebíjení či nežádoucímu hlubokému vybití, viz. dále.

4.3.2 Specifikace spínaného FV regulátoru

- Maximální vstupní napětí ($FV_{\text{panel}} - U_{\text{max}}$) – 35 V
- Maximální vstupní proud (z FV panelu - I_{max}) – 5 A
- Proudový odběr regulátoru – do 15 mA (při 12 V, klidový stav)
- Maximální výstupní proud (dáno použitou pojistkou F1) – 30 A
- Maximální zátěž na výstupu regulátoru – do 360 W
- Nastavitelné nabíjecí / výstupní napětí regulátoru – 10 ÷ 15 V
- Nastavitelné automatické odpojení / připojení zátěže
- Indikace aktivace FV regulátoru při dostatečném napětí FV panelu
- Indikace připojení / odpojení zátěže
- Ochrana proti nadměrnému přebíjení akumulátoru
- Ochrana proti hlubokému vybití akumulátoru
- Ochrana proti zkratu na výstupu regulátoru pojistkou F1

4.3.3 Schéma zapojení spínaného FV regulátoru



4.3.4 Zapojení a princip činnosti spínaného FV regulátoru

I tento typ FV regulátoru využívá k nabíjení akumulátoru konstantní napětí a lze ho snadno modifikovat i pro jiná nabíjecí napětí (6V, 12V a 24V), pro která je pak nutné vyměnit několik součástí (viz schéma). Uvedená varianta je určena pro nabíjení 12-ti voltových akumulátorů. Ze schématu na předešlé stránce je patrné, že se tento spínaný FV regulátor skládá ze dvou základních funkčních částí. První část (od FV panelu po AKU) představuje právě nastavitelný pulzní (spínaný) zpětnovazební regulátor napětí, druhou částí (od AKU po výstup) je nastavitelný automatický odpojovač zátěže. Následující odstavce popisují význam jednotlivých elementárních prvků, popřípadě částí obvodu.

Elektrolytický kondenzátor C1 představuje vstupní filtrační člen zmírňující drobné kolísání napětí na fotovoltaickém panelu, jenž je způsobené proměnlivým slunečním zářením. Následující uspořádání tranzistoru T1, Zenerovy diody ZD1, rezistoru R1 a R2, včetně monolitického integrovaného stabilizátoru napětí IO3 doplněného o kondenzátory C2, C3 a C4 (viz katalogové zapojení [17]) slouží jako funkční napájecí blok pro spínaný regulátor, který se sepne jen při dostatečné napětí FV panelu a to následujícím způsobem. Pokud je napětí na FV panelu nedostatečné pro nabíjení, jsou Zenerova dioda ZD1 polarizována závěrně a tranzistor T1 zavřený, tudíž není napájen ani stabilizátor IO3, který spouští spínaný regulátor – regulátor je vypnut a neodebírání z akumulátoru žádný proud. Tímto způsobem je též zaručeno, že při poklesu napětí na FV panelu nepoteče elektrický proud z akumulátoru zpět do FV panelu. Je-li však napětí FV panelu dostatečné k nabíjení AKU (nad 12V), je Zenerova dioda ZD1 polarizována závěrně otevřena, čímž se otevře i vstupní tranzistor T1 a umožní tak přes srážecí rezistor R2 napájet stabilizátor napětí IO3, který slouží jako zdroj napětí pro spínaný regulátor, který se tímto aktivuje.

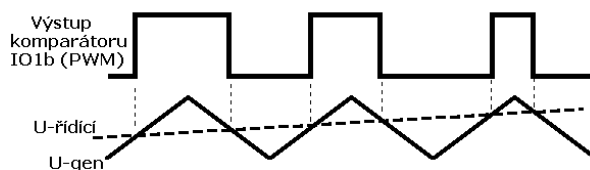
Ostatně o výskytu dostatečného napájecího napětí, resp. o aktivaci FV regulátoru svědčí i rozsvícení indikační LED diody (LED1), která je taktéž napájena, stejně jako celý spínaný regulátor, z výstupu stabilizátoru napětí IO3.

Nyní se dostáváme k principu činnosti spínaného FV regulátoru. Jako většina pulzních regulátorů obsahuje i tento obvod generátor spouštěcích impulsů, které spínají akční prvek regulátoru. Srdcem spínaného FV regulátoru je integrovaný obvod IO1 LM358 [18], který obsahuje dva nízkopříkonné operační zesilovače v pouzdře DIP8, které se osvědčily v konstrukci prvního regulátoru.

První operační zesilovač IO1a je v kombinaci s rezistory R4, R5, R6, R7, R8 a kondenzátorem C5 zapojen jako astabilní klopný obvod (AKO), na jehož výstupu je obdélníkový signál s frekvencí přibližně 50 kHz. Vhodnou úpravou výše zmíněných prvků je možné modifikovat i kmitočet spouštěcích impulsů. Rezistor R6 reprezentuje kladnou zpětnou vazbu a způsobuje hysterezi operačního zesilovače IO1a. Rezistor R8 a kondenzátor C5 představují vlastně integrační členek, z jehož výstupu je dále odváděn téměř trojúhelníkový signál s rozkmitem přibližně od 1/3 do 2/3 napájecího napětí. Tento trojúhelníkový signál konstantního kmitočtu je nutný pro pulzní šířkovou modulaci (PWM) viz dále.

Druhý operační zesilovač je zapojen jako komparátor IO1b a porovnává trojúhelníkový signál generovaný AKO s řídicím napětím přiváděným zpětnou vazbou z děliče napětí, který je tvořen rezistory R11, R12, trimrem P1 a kondenzátorem C8. Tento dělič

napětí snímá napětí na výstupu regulátoru. Komparací těchto dvou napěťových signálů vzniká na výstupu komparátoru IO1b opět obdélníkový



Obrázek 13.: Princip PWM

signál avšak s proměnnou střídou, tj. s různým poměrem impuls-mezera. To je principem pulzní šířkové modulace signálu (viz. obr. 13.). Takto modulovaný signál spíná přes srážecí rezistor R9 tranzistor T2, čímž dochází také ke spínání výkonového tranzistoru T3 typu MOSFET-P.

Pro funkci spínaného regulátoru jsou dále zapotřebí ještě následující prvky, a sice indukčnost L1 (cívka s jádrem – toroid $220\mu\text{H}/5A_{\text{max}}$), dále výstupní filtrační kondenzátory (C6+C7) o větší kapacitě a vhodná dioda D1 v tomto případě Schottkyho. Princip spínaného regulátoru pracující s PWM signálem je následující.

V ustáleném stavu je akční prvek – tranzistor T3 typu MOSFET-P spínán PWM signálem se střídou (poměr impuls-mezera), která odpovídá nastavenému a hlavně požadovanému napětí na výstupu spínaného regulátoru, tj. na straně AKU.

Pokud dojde k poklesu napětí na výstupu spínaného regulátoru například vlivem větší zátěže, zmenší se i hlídané řídicí napětí na děliči $R_{11}+R_{12}+P_1+C_8$, jehož poměrná část, nastavitelná trimrem P_1 , je přiváděna zpětnou vazbou ke komparátoru IO1b. Komparátor toto napětí ($U_{\text{řídící}}$) porovná s napětím generátoru (U_{gen}), čímž dojde ke změně střídý PWM signálu tak, že se prodlouží doba sepnutí tranzistoru T3 a současně zkrátí doba rozepnutí (viz. obr. 13.). Tím je docíleno, že filtrační kondenzátory C_6 a C_7 na výstupu regulátoru jsou přes cívku L_1 nabíjeny delší dobu, čímž vzroste i výstupní napětí opět na požadovanou mez.

Pokud dojde naopak ke zvýšení výstupního napětí nad požadovanou, nastavenou úroveň, zvýší se tím i sledované řídicí napětí na děliči. Komparátor IO1b tuto skutečnost zaznamená, v důsledku čehož následně opět upraví střídu PWM signálu tentokrát tak, že se zkrátí doba sepnutí tranzistoru T3 a prodlouží mezera mezi spouštěcími impulsy. Tím je způsobeno, že se filtrační kondenzátory C_6 a C_7 budou nabíjet kratší dobu, přičemž zákonitě poklesne i výstupní napětí opět na stanovanou hodnotu.

Spojení toroidní cívky L_1 a kombinace filtračních kondenzátorů na výstupu představuje vlastně filtrační člen LC. Toroidní cívka L_1 a Schottkyho dioda D_1 mají ještě jednu funkci. Jednou ze základních fyzikálních vlastností cívky s jádrem je, že dokáže naakumulovat určitou část elektrické energie ve svém magnetickém poli a právě toho je využito pomocí rekuperační diody D_1 , která vrací tuto energii cívky zpět do obvodu.

Pokud je výkonový spínaný tranzistor T3 typu MOSFET-P sepnutý, prochází proud cívkou L_1 a nabíjí filtrační kondenzátory C_6 a C_7 na výstupu. Rekuperační Schottkyho dioda D_1 je v této fázi polarizována závěrně. Protože proud v tomto okamžiku prochází i cívkou (tlumivkou) L_1 , část energie se v cívce naakumuluje.

V okamžiku, kdy se tranzistor T3 uzavře, otočí se v důsledku Lenzova zákona polarita napětí na cívce L1, čímž se rekuperační Schottkyho dioda D1 polarizuje propustně a odvede tak energii z cívky L1 taktéž na výstup regulátoru. Tím je docíleno dalšího zvýšení efektivity spínaného FV regulátoru.

Protože spínaný FV regulátor pracuje se signálem o frekvenci desítek kHz, je výstupní napětí jen minimálně zvlněné, takže můžeme tvrdit, že spínaný regulátor pracuje s nabíjecí charakteristikou o konstantním napětí, které je možné jednoduše nastavit pomocí trimru P1. Následující podkapitola popisuje druhou část regulátoru, a sice automatický odpojovač zátěže.

4.3.5 Princip automatického připojení / odpojení zátěže od akumulátoru

Jak již zde bylo naznačeno, tak druhou částí obvodu FV regulátoru (od AKU po výstup) je automatický odpojovač zátěže, jehož princip je velmi podobný jako u prvního typu FV regulátoru. Obvod automatického odpojovače využívá i stejné obvodové prvky jako původní typ odpojovače [13, 20]. Liší se hlavně jiným uspořádáním a drobnými úpravami, které odpojovač plně automatizovaly a vyřadily tak nutnost manuálního připojování stiskem tlačítka.

Srdcem odpojovače je opět operační zesilovač LM311 v pouzdře DIP8 [19], který opět plní funkci komparátoru, jenž hlídá napětí akumulátoru, podle čehož automaticky odpojuje, popřípadě připojuje zátěž, aby nedošlo k nežádoucímu hlubokému vybíjení AKU.

Na neinvertující vstup (+) komparátoru IO2 je přivedeno referenční konstantní napětí 5V z monolitického integrovaného stabilizátoru 78L05 (IO4) zapojeného podle katalogového listu [16]. Na invertující vstup (-) komparátoru IO2 je přivedeno napětí z odporového děliče, který snímá napětí na AKU. Odporový dělič je tvořen rezistory R13 a R14, trimrem P2 a kondenzátorem C9. Výkonový tranzistor T5 typu MOSFET-N je se svou spínací větví tentokrát zařazen až nakonec obvodu. Proto je jak komparátor IO2, tak stabilizátor napětí IO4 neustále napájen, takže obvod odpojovače je stále aktivní i při odpojené zátěži. Princip činnosti automatického odpojovače zátěže od FV regulátoru, včetně AKU, je následující.

Napětí akumulátoru, resp. jeho poměrná část nastavitelná trimrem P2, se porovnává s konstantním referenčním napětím stabilizátoru IO4. Je-li napětí akumulátoru dostatečné k napájení zátěže, je na invertujícím vstupu komparátoru větší napětí než na neinvertujícím vstupu (trimrem P2 nastavená hodnota např. $6\text{ V} > 5\text{ V}$ ze stabilizátoru IO4) a na výstupu komparátoru je napětí blízké 0 V. Tranzistor T4 typu PNP je otevřen a přivádí tak na řídicí elektrodu unipolárního tranzistoru T5 kladné napětí, které jej udržuje v otevřeném stavu. Ostatně **připojení zátěže signalizuje indikační dioda LED2**, která svítí, neboť je polarizovaná v propustném směru.

Vybíjením akumulátoru se zmenší jeho napětí, přičemž poklesne i hlídané napětí na děliči (R13 + R14 + P2). Nyní má komparátor na invertujícím vstupu menší napětí než na neinvertujícím (na trimru P2 např. $4,9\text{ V} < 5\text{ V}$ ze stabilizátoru IO4), komparátor se překlopí, rozsvítí se **druhá indikační dioda LED3 signalizující odpojení zátěže**, a tranzistory T4 a T5 se zavřou, v důsledku čehož odpojí zátěž. V tomto stavu obvod odebírá z akumulátoru zanedbatelný proud do 15 mA.

A protože oproti první verzi odpojovače má tento automatický odpojovač neustále napájený komparátor IO2 a stabilizátor napětí IO4 (tranzistor T5 je až na konci obvodu), je proto stále aktivní a čeká, až se napětí na AKU opět navýší, aby mohl znovu připojit zátěž. Zátěž by se ale připojila okamžitě, jakmile by FV panel na vstupu FV regulátoru navýšil napětí, čímž by se chvilkově zvýšilo i nabíjecí napětí akumulátoru, aniž by se akumulátor stihl částečně dobít.

Z tohoto důvodu byla u komparátoru IO2 zavedena nastavitelná kladná zpětná vazba (rezistor R15 a trimr P3), která zapříčiňuje hysterezi komparátoru a to tak, že komparátor odpojí zátěž například při nastaveném napětí 11,0 V (nastaveno trimrem P2), ale zátěž připojí až tehdy, zvýší-li se napětí na AKU například na 12,5 V (hystereze nastavena trimrem P3) viz nastavení odpojovače zátěže. Odpadá tak nutnost manuálního připojování zátěže.

4.3.6 Nastavení spínaného FV regulátoru

Následující podkapitola opět popisuje nezbytné nastavení spínaného FV regulátoru včetně automatického odpojovače před prvním připojením FV panelu, akumulátoru a zátěže.

Zprvu je nutné nastavit velikost nabíjecího napětí podle použitého typu akumulátoru. Na vstupní svorky X1 pro FV panel připojíme místo FV panelu regulovatelný stejnosměrný stabilizovaný zdroj s nastavitelným napětím, postačí zdroj do 30V/2A. Na SS zdroji nastavíme například 20 V. Na svorky X2 pro akumulátor připojíme voltmetr a odporovým trimrem P1 nastavíme požadované nabíjecí výstupní napětí v rozmezí například 13,8 až 14,2 V (viz doporučené nabíjecí napětí použitého Pb akumulátoru stanovené výrobcem). Vstupní napětí na SS zdroji můžeme na zkoušku zvýšit či snížit a kontrolujeme výstupní napětí na voltmetru. Případné odchylky doladíme.

Další dvě nastavení FV regulátoru byly naznačeny v předchozí kapitole a týkají se automatického odpojení a opětovného připojení zátěže. K nastavení automatického odpojovače použijeme opět stabilizovaný stejnosměrný regulovaný zdroj, který připojíme tentokrát na svorky X2 na místo akumulátoru, ke kterému paralelně připojíme první voltmetr, abychom mohli měřit i napětí na SS zdroji. Na výstupní svorky X3, které jsou určeny k napájení zátěže, připojíme druhý voltmetr. Na stejnosměrném zdroji se nastaví požadované vypínací napětí (záleží na použitém typu akumulátoru, např. 10,5 V), při kterém odpojovač odpojí zátěž od FV regulátoru a zamezí tak nežádoucímu hlubokému vybíjení akumulátoru. Napětí je na výstupu kontrolováno voltmetrem. Odporový trimr P2 nastavíme do takové polohy, kdy se právě mění napětí na výstupu komparátoru LM311 a indikační dioda LED2 (zátěž připojena) zhasne a rozsvítí se signalizační LED3 (zátěž odpojena). Výstupní svorky X3 jsou v tomto stavu odpojeny a výstupní napětí je nulové. Poté budeme napětí SS zdroje pomalu zvyšovat až na napětí například 12,5 V. Odporovým trimrem P3 nastavíme hysterezi komparátoru IO2 (LM311) a to tak, že se musí překlopit právě při napětí 12,5 V a automaticky připojit zátěž zpět k FV regulátoru, resp. k akumulátoru. O opětovném připojení zátěže budou opět informovat indikační diody LED2 a LED3.

Doporučuji funkci automatického odpojovače několikrát vyzkoušet. Automatika odpojovače musí fungovat tak, že odpojí zátěž například při napětí 10,5 V na akumulátoru a nepřipojí zátěž dříve, nežli stoupne napětí na straně AKU na nastavenou mez například na 12,5 V. Případné nedostatky doladíme trimry P2 a P3. Není snad třeba připomínat, že jedině správné nastavení odpojovače dokáže zamezit nežádoucímu hlubokému vybíjení akumulátoru.

4.3.7 Zhodnocení spínaného FV regulátoru

Z konstrukčních důvodů bylo opět přihlédnuto k běžně dostupným součástkám. Oproti předešlým regulátorům se spínaný FV regulátor vyznačuje mnohem větší účinností regulace, aniž by docházelo k markantním, zbytečným, tepelným ztrátám na akčních prvcích FV regulátoru. Velkou předností je možnost nabíjet akumulátor většími proudy, což umožňuje regulátor připojit k výkonnějšímu FV systému - panelům a použít větší akumulátor o větší kapacitě. Pokud by bylo žádané dobíjet akumulátor i větším elektrickým proudem než 5 A bylo by nutné správně nadimenzovat vstupní filtr C1, cívku L1, výstupní filtr C6+C7 a použít i adekvátně veliké pasivní ALU chladiče pro T3, D1 a T5 nemluvě o dostatečném pocínování proudově namáhaných plošných spojů.

Funkce tohoto regulátoru je spolehlivá a efektivní, přesto by bylo možné namítnout, že je tento spínaný FV regulátor navržen zbytečně složitě. To byl však můj úmyslný záměr, na kterém byl dostatečně popsán princip pulzní regulace napětí. V současné době se vyrábějí a hojně používají integrované spínané regulátory napětí realizované rovnou v jednom jediném pouzdře, které též umožňují pulzní regulaci výstupního napětí, avšak potřebují ke své funkci jen několik nutných obvodových prvků - součástek. A právě v tomto duchu je koncipován i následující a poslední FV regulátor, který pracuje taktéž v pulzním módu.

4.4 Fotovoltaický regulátor PWM s obvodem LM2576T-ADJ

4.4.1 Popis FV regulátoru s obvodem LM2576T-ADJ

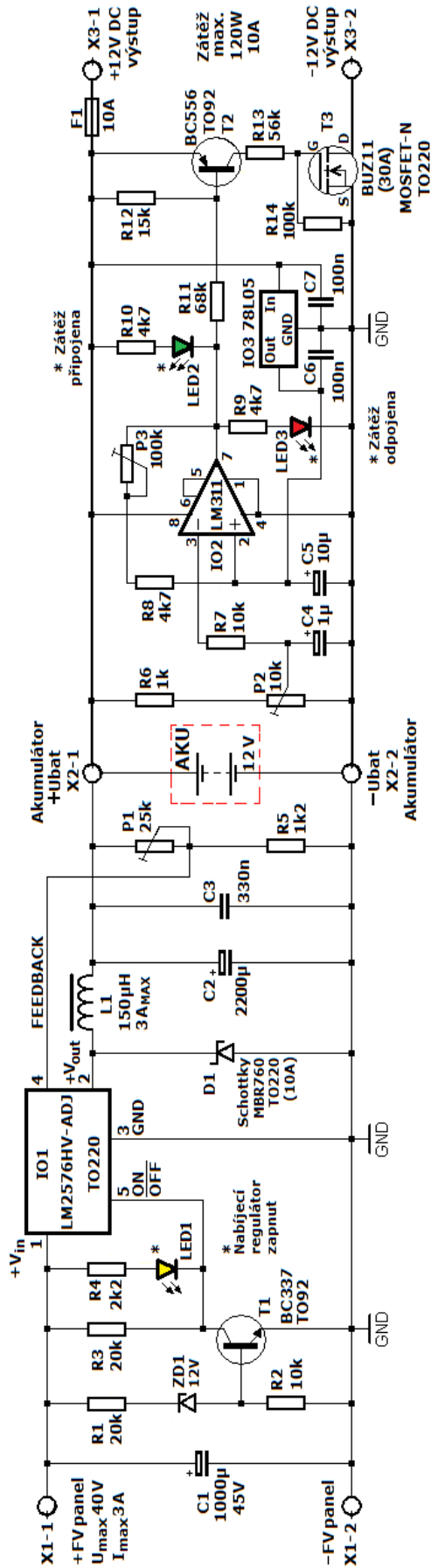
Jak již bylo naznačeno, následující spínaný FV regulátor používá k regulaci nabíjecího a současně výstupního napětí jediný integrovaný obvod, který je doplněn o několik pro funkci nezbytných součástí, což značně zjednodušuje strukturu a stabilitu zapojení. Podobné integrované pulzní regulátory vyrábí v současné době několik firem v mnoha variantách (například obvody L4970A, LT1072CT,...). Pro realizaci pulzního FV regulátoru byl však vybrán obvod od firmy National Semiconductor a sice integrovaný obvod LM2576T-ADJ.

Regulátor je také rovněž doplněn o automatický odpojovač zátěže, přičemž zabezpečuje funkce ochrany proti nežádoucímu přebíjení či hlubokému vybíjení akumulátoru. Podrobnější popis tohoto regulátoru je uveden v následujících kapitolách.

4.4.2 Specifikace FV regulátoru s obvodem LM2576T-ADJ

- Maximální vstupní napětí ($FV_{\text{panel}} - U_{\text{max}}$) – 45 V
- Maximální vstupní proud (z FV panelu - I_{max}) – 3 A
- Proudový odběr regulátoru – do 10 mA (při 12 V, klidový stav)
- Maximální výstupní proud (dáno použitou pojistkou F1) – 10 A
- Maximální zátěž na výstupu regulátoru – do 120 W
- Nastavitelné nabíjecí / výstupní napětí regulátoru – 1,2 ÷ 37 V
- Nastavitelné automatické odpojení / připojení zátěže
- Indikace aktivace regulátoru při dostatečném napětí FV panelu
- Indikace připojení / odpojení zátěže
- Ochrana proti nadměrnému přebíjení akumulátoru
- Ochrana proti hlubokému vybití akumulátoru
- Ochrana proti zkratu na výstupu regulátoru pojistkou F1

4.4.3 Schéma zapojení spínaného FV regulátoru s obvodem LM2576T-ADJ



4.4.4 Zapojení a princip činnosti spínaného FV regulátoru s LM2576T-ADJ

I tento typ FV regulátoru využívá k nabíjení akumulátoru konstantní napětí, a protože umožňuje své výstupní napětí regulovat v širokém intervalu přibližně od 1,2 V do cca 37 V (s ohledem na vstupní napětí), lze ho snadno použít pro různá nabíjecí napětí (6V, 12V, 24V a 36V), přičemž struktura zapojení zůstává stále stejná. I tento spínaný FV regulátor se skládá ze dvou základních funkčních částí. První část (od FV panelu po AKU) představuje právě nastavitelný pulzní (spínaný) zpětnovazební regulátor napětí, druhou částí (od AKU po výstup) je opět nastavitelný automatický odpojovač zátěže. Koncepce je tedy identická s tou předchozí, nicméně je mnohem jednodušší, což je dáno použitím integrovaného regulátoru LM2576T-ADJ.

Monolitický integrovaný obvod LM2576T-ADJ je jednoduchý, spínaný, napěťový regulátor v pouzdře TO220 s 5-ti vývody [21]. Z principu pulzní regulace napětí, který byl podrobně popsán u předešlého typu FV regulátoru, vyplývá nezbytnost několika funkčních bloků, které jsou integrovány v tomto obvodu IO1. Je v něm realizován fixní generátor spouštěcího signálu pracující s frekvencí 52 kHz, dále obsahuje frekvenční kompenzaci, rozdílový zesilovač porovnávající odchylky napětí přivedené zpětnou vazbou na interní dělič napětí, napěťovou referenci 1,23 V, komparátor, PWM modulátor, interní akční spínací člen - tranzistor a další dílčí obvody. Oproti předešlému typu FV regulátoru disponuje také tento integrovaný obvod tepelnou a proudovou pojistkou, která chrání regulátor LM2576T-ADJ před jeho zničením. Z výše uvedených informací je patrné, že se jedná o obvod s velkou hustotou integrace.

Pro správnou funkci spínaného regulátoru napětí LM2576T-ADJ je nutné použít několik nezbytných prvků, které si následně popíšeme. Jen pro úplnost doplním, že se jedná o výrobcem doporučené zapojení podle katalogového listu [21]. Elektrolytický kondenzátor C1 nepředstavuje opět nic jiného, než vstupní filtrační člen zmírňující drobné kolísání napětí na fotovoltaickém panelu, jenž je způsobené proměnlivým slunečním zářením. Následující uspořádání rezistorů R1, R2, R3, dále Zenerova dioda ZD1 a tranzistor T1 představují aktivační, resp. spínací blok, který je zapojen na pin číslo 5 (ON/OFF) a pracuje následujícím způsobem.

Ve valné většině případů je při běžné aplikaci spínaného regulátoru napětí LM2576T-ADJ výstup č. 5 uzemněn, čímž je na pin ON/OFF přivedeno nulové napětí. To způsobuje, že se integrovaný obvod spustí a začne regulovat téměř okamžitě při přivedení vstupního napětí, které je větší než 1,2 V. Existují však případy, kdy je třeba spínaný regulátor udržovat zpočátku vypnutý do doby, než se na vstup přivede napětí určité velikosti, které regulátor aktivuje. A právě této vlastnosti je využito i zde. Báze tranzistoru T1 je zapojena na anodu Zenerovy diody ZD1 ($U_{zen} = 12\text{ V}$), která je polarizována v závěrném směru. Při nízkém vstupním napětí na děliči R1+ZD1+R2 je Zenerova dioda uzavřena, čímž je uzavřen i tranzistor T1. Tím je zaručeno, že je přes srážecí rezistor R3 na pin č. 5 (ON/OFF) přiváděno kladné napětí ze vstupu, které udržuje spínaný regulátor v pasivním stavu. Při zvýšení vstupního napětí nad hodnotu 12 V se Zenerova dioda otevře a přivede tak kladné napětí i na bázi tranzistoru T1. Až při vstupním napětí přibližně 13 V se otevře i tranzistor T1 typu NPN, protože má na bázi dostatečné napětí (cca 1 V), čímž připojí pin č. 5 na zem a spínaný regulátor se tímto aktivuje. Ostatně o aktivaci regulátoru svědčí i LED dioda LED1, který je polarizována propustně. Stejně jako u předešlého FV regulátoru spustí tento aktivační blok spínaný regulátor jen tehdy, je-li napětí na FV panelu dostatečně velké pro nabíjení akumulátoru. V opačném případě tento blok deaktivuje regulátor, což zabezpečí, že nepoteče elektrický proud z akumulátoru zpět do FV panelu.

Další prvky připojené k obvodu spínaného regulátoru mají stejný význam jako obvodové prvky předcházejícího FV regulátoru. Na výstupu je zapojen LC filtr tvořen toroidní tlumivkou L1 a kondenzátory C2 a C3. Schottkyho dioda D1 je opět rekuperační, čili odvádí energii cívky na výstup regulátoru ve fázi, kdy je interní akční prvek spínaného regulátoru rozepnut. Za LC filtrem, paralelně se svorkami akumulátoru, je zapojen dělič napětí tvořen trimrem P1 a rezistorem R5. Z tohoto děliče je poměrná a nastavitelná část výstupního napětí přiváděna zpětnou vazbou zpět do spínaného regulátoru LM2576T-ADJ (pin č. 4), podle kterého je řízena PWM modulace. Více externích, elementárních, obvodových prvků spínaný regulátor opravdu nepotřebuje. Jak již zde bylo naznačeno, tak druhou částí obvodu FV regulátoru (od AKU po výstup) představuje automatický odpojovač zátěže, který je naprosto identický jako u předchozího FV regulátoru, takže ho není třeba opět popisovat.

4.4.5 Nastavení spínaného FV regulátoru s obvodem LM2576T-ADJ

Nezbytností je opět správné prvotní nastavení spínaného FV regulátoru. Velikost výstupního nabíjecího napětí FV regulátoru se opět nastavuje pomocí nastavitelného SS zdroje a voltmetru podle použitého akumulátoru. Na vstupní svorky X1 pro FV panel připojíme místo FV panelu regulovatelný stejnosměrný stabilizovaný zdroj, na které nastavíme vstupní napětí například 20 V. Na svorky X2 pro akumulátor připojíme voltmetr a odporovým trimrem P1 nastavíme požadované výstupní napětí viz. doporučené nabíjecí napětí AKU stanovené výrobcem. Vstupní napětí na SS zdroji můžeme na zkoušku zvýšit či snížit a kontrolujeme výstupní napětí na voltmetru. Případné odchylky doladíme.

Nastavení napěťových úrovní pro automatické odpojení a připojení zátěže je identické jako u předešlého FV regulátoru (viz kapitola 4.3.6).

4.4.6 Zhodnocení spínaného FV regulátoru s obvodem LM2576T-ADJ

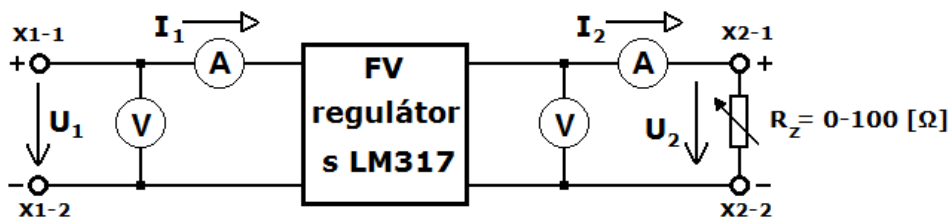
I v tomto případě bylo opět přihlédnuto k běžně dostupným součástkám. Svou jednoduchou elektronickou koncepcí, spojenou s menším počtem součástek, umožňuje tento poslední FV regulátor jednoduchou realizaci, nastavení, či případné snadné opravy. V porovnání s předešlými FV regulátory je tento poslední uvedený typ zřejmě nejefektivnější ve smyslu regulace výkonu FV panelu pro nabíjení AKU, což bude ověřeno měřením.

V každém případě též platí, že akční součástky je nutné správně nadimenzovat, a v případě spínaného regulátoru napětí LM2576T-ADJ, včetně rekuperační Schottkyho diody D1, použít adekvátně velké pasivní ALU chladiče. Proudově namáhané spoje doporučuji pocínovat.

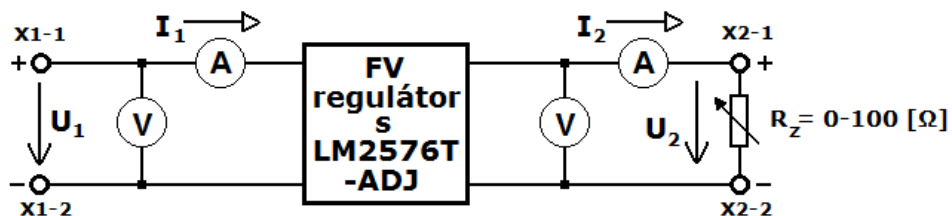
5 Měření na vybraných FV regulátorech

V rámci mé diplomové práce byly sestaveny dva FV dobíjecí regulátory, a sice první FV regulátor s integrovaným stabilizátorem LM317 pracující jako lineární zpětnovazební stabilizátor napětí a poslední regulátor s integrovaným obvodem LM2576T-ADJ pracující na principu pulzního zpětnovazebního stabilizátoru (PWM). Na zmíněných FV regulátorech byla provedena měření efektivity regulace výkonu z FV panelů v závislosti na výstupním zatěžovacím proudu. V obou případech vycházel princip měření v podstatě z určení zatěžovací charakteristiky FV regulátorů jakožto stabilizátorů napětí. Zatěžovací charakteristika je obecně závislost výstupního napětí U_2 na zatěžovacím (výstupním) proudu I_2 při jmenovité konstantní úrovni vstupního napětí U_1 , tzn. $U_2 = f(I_2)$ při $U_1 = konst.$

Obvody byly zapojeny podle schémat viz obrázky 14. a 15. Na vstupní svorky X1 určené pro FV panel byl vždy připojen nastavitelný SS zdroj, na němž bylo nastaveno v obou případech konstantní vstupní napětí $U_1 = 18\text{ V}$. Na výstupní svorky X2 byl na místo AKU připojen potenciometr, kterým bylo možné měnit zatížení FV regulátorů (změna R_z), což mělo za následek změny výstupního proudu I_2 .



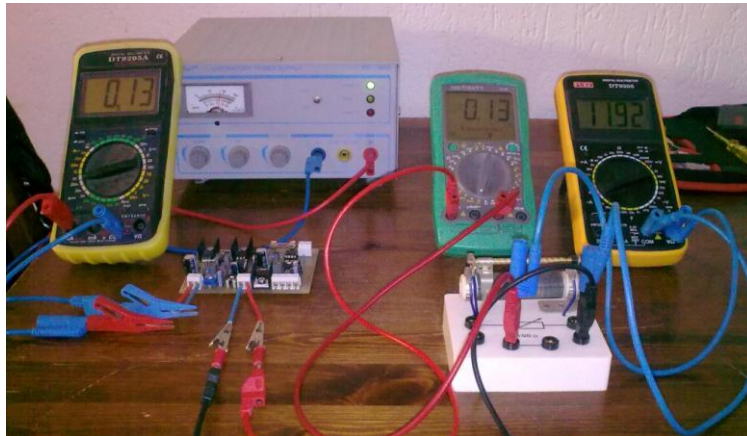
Obrázek 14.: Měření účinnosti na FV regulátoru s obvodem LM317



Obrázek 15.: Měření účinnosti na FV regulátoru s obvodem LM2576T-ADJ

Z naměřených hodnot bylo možné určit příkon P_1 , výkon P_2 a účinnost η . Tabulky naměřených hodnot pro oba uvedené regulátory jsou uvedeny dále.

5.2 Naměřené hodnoty na FV regulátoru s obvodem LM317



I_1 [A]	0,13	0,21	0,25	0,30	0,35	0,40	0,46	0,50	0,55	0,60	0,65	0,71	0,75	0,80	0,85	0,92	0,95	1,01
U_1 [V]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
I_2 [A]	0,13	0,20	0,25	0,30	0,34	0,40	0,45	0,50	0,54	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
U_2 [V]	12,05	12,00	11,97	11,95	11,94	11,92	11,91	11,90	11,89	11,88	11,88	11,87	11,86	11,86	11,86	11,86	11,85	11,84
P_1 [W]	2,34	3,78	4,50	5,40	6,30	7,20	8,28	9,00	9,90	10,80	11,70	12,78	13,50	14,40	15,30	16,56	17,10	18,18
P_2 [W]	1,57	2,40	2,99	3,59	4,06	4,77	5,36	5,95	6,42	7,13	7,72	8,31	8,90	9,49	10,08	10,67	11,26	11,84
η [%]	66,9	63,5	66,5	66,4	64,4	66,2	64,7	66,1	64,9	66,0	66,0	65,0	65,9	65,9	65,9	64,5	65,8	65,1

účinnost FV regulátoru s LM317:

$$\eta = (P_2 / P_1) \cdot 100 = 65,5 \pm 0,889 \text{ [%]}$$

5.3 Naměřené hodnoty na FV regulátoru s obvodem LM2576T-ADJ



I_1 [A]	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
U_1 [V]	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
I_2 [A]	0,17	0,23	0,29	0,35	0,42	0,48	0,55	0,60	0,65	0,74	0,80	0,86	0,93	0,99	1,05	1,12	1,17	1,24
U_2 [V]	11,98	11,94	11,89	11,80	11,85	11,84	11,82	11,81	11,80	11,79	11,77	11,76	11,74	11,73	11,72	11,71	11,70	11,69
P_1 [W]	2,70	3,60	4,50	5,40	6,30	7,20	8,10	9,00	9,90	10,80	11,70	12,60	13,50	14,40	15,30	16,20	17,10	18,00
P_2 [W]	2,04	2,75	3,45	4,13	4,98	5,68	6,50	7,09	7,67	8,72	9,42	10,11	10,92	11,61	12,31	13,12	13,69	14,50
η [%]	75,4	76,3	76,6	76,5	79,0	78,9	80,3	78,7	77,5	80,8	80,5	80,3	80,9	80,6	80,4	81,0	80,1	80,5

účinnost FV regulátoru PWM:

$$\eta = (P_2 / P_1) \cdot 100 = 79,1 \pm 1,853 \text{ [%]}$$

6 Závěr

Fotovoltaické dobíjecí regulátory, jejichž elektronické koncepce jsou uvedeny v mé diplomové práci, byly záměrně navrženy tak, aby je bylo možné realizovat levně, jednoduše, a za pomoci běžně dostupných elektronických součástek s minimálním množstvím složitých integrovaných obvodů.

Uvedené FV regulátory umožňují libovolné nastavení mezních nabíjecích a vybíjecích napětí, což dovoluje maximální přizpůsobení pro nejrůznější varianty akumulátorů. Nastavení mezního vybíjecího napětí rovněž umožňuje definovat v podstatě libovolnou hloubku vybíjení konkrétního akumulátoru, což v případě optimálního nastavení příznivě přispívá k dosažení maximální životnosti použitého akumulátoru.

Z naměřených hodnot na dvou vybraných FV regulátorech je patrné, že regulátory pracující na principu lineární stabilizace napětí dosahují účinnosti přibližně jen 65 %. Jedná se však o jednoduché elektronické koncepce, které dosahují optimálních výsledků v případě stabilizace výstupního napětí, které je svou velikostí blízké napětí vstupnímu, popřípadě při menších odebíraných proudech, kdy výkonové ztráty na akčních členech nejsou tak markantní.

Mnohem lepších vlastností, resp. účinnosti dosahují FV dobíjecí regulátory pracující na principu spínaných zpětnovazebních stabilizátorů (PWM regulátory). Účinnost spínaných FV regulátorů dosahuje při správném návrhu až 80 % (viz naměřené údaje). Poslední uvedený pulzní FV regulátor s obvodem LM2576T-ADJ tedy představuje vcelku efektivní a hlavně jednoduchý spojovací článek, který adekvátně reguluje výkon FV panelů pro optimální nabíjení akumulátoru.

Nicméně se v ostrovních FV systémech používají ještě dobíjecí regulátory pracující na bázi MPPT, což spočívá v neustálé sledování bodu maximálního pracovního výkonu FV panelů, podle čehož tyto regulátory upravují energii z FV panelů tak, aby nabíjení akumulátorů bylo co možná nejefektivnější s minimálními ztrátami. Dosahují účinnosti až nad 90 %. Jejich obvody jsou však mnohem složitější, tudíž libovolné nastavení či případné opravy u nich nepřipadají v úvahu.

7 Použitá literatura

- [1] HENZE, Andreas; HILLEBRAND, Werner. Elektrický proud ze slunce: fotovoltaika v praxi. Ostrava : HEL, 2002. 136 s. ISBN 80-86167-12-7.
- [2] LIBRA, Martin; POULEK, Vladislav. *Fotovoltaika, teorie i praxe využití solární energie*. Praha : ILSA, 2009. 160 s.
- [3] MURTINGER, Karel; BERANOVSKÝ, Jiří; TOMEŠ, Milan. *Fotovoltaika elektřina ze slunce*. Brno : ERA, 2008. 81 s.
- [4] LIBRA, Martin, Jan MAREŠ a Vladislav POULEK. Akumulace elektrické energie. In: *ELEKTRO Odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. 2011 [cit. 2013-06-19]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=42869
- [5] ARENDÁŠ, Miroslav; RUČKA, Milan. *Nabíječky a nabíjení*. 3. upravené. Praha : BEN, 2002. 112 s. ISBN 80-86056-61-9.
- [6] Olověné baterie pro ostrovní systémy. *Baterie OPzS a OPzV* [online]. 2012 [cit. 2013-06-27]. Dostupné z: <http://eshop.neosolar.cz/fotovoltaika/solarni-baterie/baterie-opzs-a-opzv/>
- [7] Skoro vše o akumulátorech a nabíjení. *Cezeta 175/487* [online]. [cit. 2013-06-24]. Dostupné z: <http://www.cezeta487.ic.cz/Documents/akumulatory.pdf>
- [8] *Katalogový list stacionárního solárního AKU OPzS Hoppecke*. [online]. 2012 [cit. 2013-06-27]. Dostupné z: http://eshop.neosolar.cz/images_content/607/1816-O-opzs-solar-power.pdf
- [9] *Katalogový list solárního AGM akumulátoru Hoppecke*. [online]. 2012 [cit. 2013-06-27]. Dostupné z: http://eshop.neosolar.cz/images_content/550/1533-O-solar-bloc-cz-h.pdf
- [10] *Katalogový list solárního gelového AKU OPzV Hoppecke*. [online]. 2012 [cit. 2013-06-27]. Dostupné z: http://eshop.neosolar.cz/images_content/626/1835-O-opzv-bloc-solar-power.pdf
- [11] LIBRA, Martin; MAREŠ, Jan. Akumulace energie v solárních fotovoltaických systémech. In: *ELEKTRO Odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. 2006 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=27050
- [12] *Katalogový list FV panelů BlueSolar Monocrystal Si*. [online]. 2012 [cit. 2013-06-27]. Dostupné z: <http://www.mulac.cz/userfiles/file/Datasheet-BlueSolarMonocrystallinePanels.pdf>

- [13] KRČKA, Pavel. *Vytvoření přípravku pro určení optimálního nastavení fotovoltaických panelů*. České Budějovice, 2010. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce Ing. Michal Šerý.
- [14] PETERKA, Petr. Regulátor k fotovoltaickému panelu. *Praktická elektronika A-Radio*. 2009, roč. 2009, č. 10, s. 20-23.
- [15] *Katalogový list obvodu LM317*. [online]. c2010 [cit. 2010-01-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/8619/NSC/LM317.html>>.
- [16] *Katalogový list obvodu 78L05*. [online]. 2010 [cit. 2010-01-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/9047/NSC/78L05.html>>.
- [17] *Katalogový list obvodu 78L12*. [online]. 2013 [cit. 2013-06-10]. Dostupné z WWW: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/33672/WINGS/78L12.html>
- [18] *Katalogový list obvodu LM358*. [online]. 2010 [cit. 2010-01-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/11672/ONSEMI/LM358.html>>.
- [19] *Katalogový list obvodu LM311*. [online]. 2010 [cit. 2010-01-03]. Dostupné z WWW: <<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/8611/NSC/LM311.html>>.
- [20] BELZA, Jaroslav. *Odpojovač pro olověný akumulátor*. [online]. 2000 [cit. 2009-12-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.belza.cz/files1/odp.htm>>.
- [21] *Katalogový list obvodu LM2576T-ADJ*. [online]. 2013 [cit. 2013-01-17]. Dostupné z WWW: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/8764/NSC/LM2576T-ADJ.html>
- [22] *Velkokapacitní kondenzátor 1,2F/24V*. Profi-elektronika: Kapacitor US BLASTER USB 5470, 1,2 F - USB 5470. *Profi-elektronika* [online]. 2013 [cit. 2013-06-18]. Dostupné z: <http://www.profi-elektronika.cz/kapacitor-us-blaster-usb-5470-1-2-f-usb-5470/id/50-116054/>
- [23] Stacionární akumulátory Hoppecke. *1AlphaSolar* [online]. 2013 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://1alphasolar.cz/kategorie-99-akumulatory-hoppecke>
- [24] Solární akumulátor 12V/100Ah Banner. *Solar-Shop* [online]. 2013 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: http://www.solar-shop.cz/index.php?main_page=product_info&products_id=3808
- [25] Varta DC AGM 70Ah. *ObchodSolar.cz*. [online]. 2013 [cit. 2013-06-26]. Dostupné z: <http://www.obchodsolar.cz/obchodsolar/eshop/19-1-Trakcni-solarni-baterie/0/5/226-Varta-DC-AGM-70Ah>

- [26] Solární baterie Hoppecke OPzV 12V bloc solar.power 180. *NeoSolar: Energie a úsporné technologie* [online]. [cit. 2013-06-24]. Dostupné z: <http://eshop.neosolar.cz/solarni-baterie-hoppecke-opzv-12v-bloc-solar-power-180>
- [27] Solární regulátor nabíjení. *Ostrovní fotovoltaické elektrárny a systémy* [online]. 2011 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://www.ostrovni-fotovoltaika.cz/solarni-regulatory/>

8 Seznam zdrojů obrázkové dokumentace

Obrázek 1., 3., 4., 10., 11., 12., 13., 14., 15., 16., 17., 18., 19.: autor

Obrázek 2.: [22]

Obrázek 5.: [23]

Obrázek 6.: [24]

Obrázek 7.: [25]

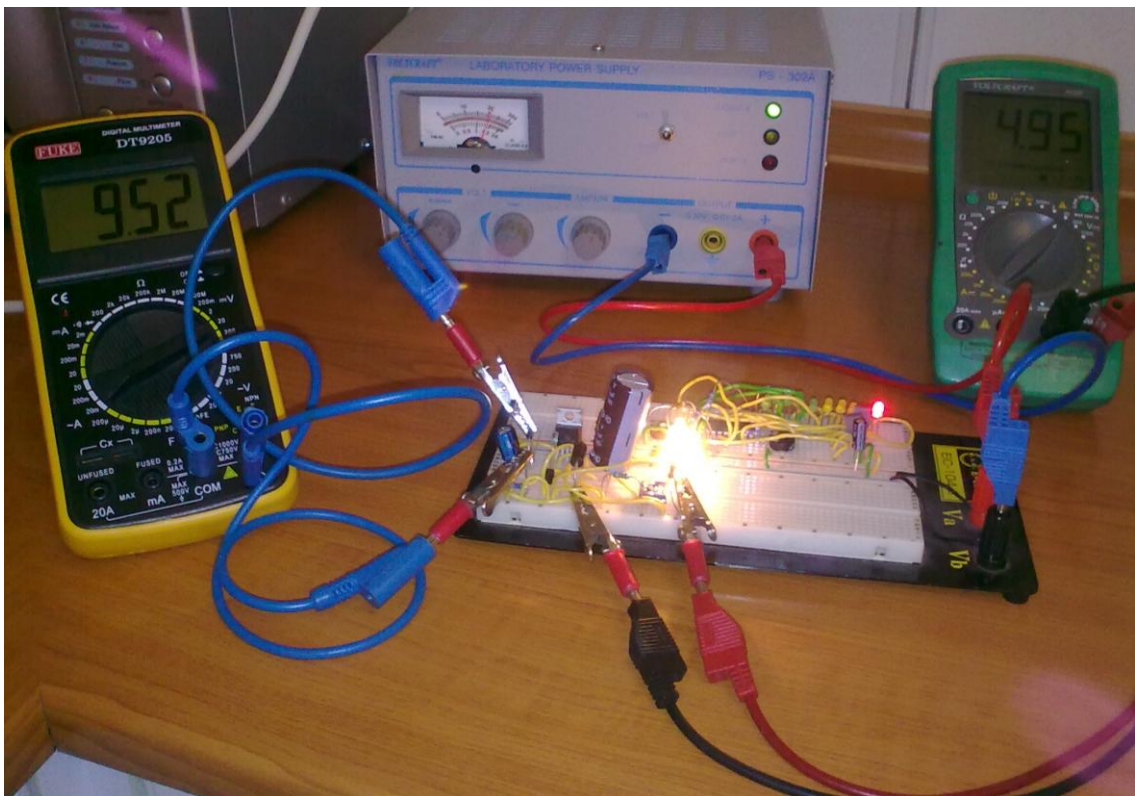
Obrázek 8.: [26]

Obrázek 9.: [27]

9 Příloha – fotodokumentace k návrhům FV regulátorů



Obrázek 16.: Testování FV regulátoru s obvodem LM317 na kontaktním nepájivém poli



Obrázek 17.: Testování FV regulátoru s IO LM2576T-ADJ na kontaktním nepájivém poli



Obrázek 18.: Testování FV regulátorů při nabíjení olověného akumulátoru



Obrázek 19.: Pohled na experimentální uspořádání jednoduchého FV systému