

*Česká zemědělská univerzita v Praze*

*Technická fakulta*

*Katedra fyziky*

# *Ostrovní fotovoltaické systémy*

*Diplomová práce*

*Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Libra, CSc.*  
*Autor práce: Jan Mareš*

*2008 v Praze*

# *Ostrovní fotovoltaické systémy*

Prohlášení

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího dipl. práce pana docenta Martina Libry a s použitím literatury a zdrojů v práci uvedených.

Toto stvrzuji svým podpisem: .....

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové panu doc. Ing. Martinu Librovi CSc. za cenné připomínky a pomoc při řešení této práce a mé výzkumné činnosti. Poděkování rovněž patří mým nejbližším a rodině za pomoc a podporu.

**Abstrakt:** Práce se zabývá ostrovními (autonomními) fotovoltaickým systémy, převážně teorií jejich činnosti a částí a dále praktickým měřením provedeným na pokusném fotovoltaickém systému na katedře fyziky ČZU v Praze. Teoretická část práce seznamuje s částmi systému a možnostmi využití tohoto systému. V praktické části jsou popsány možnosti nabíjení akumulátoru k akumulaci elektrické energie a teorie použitých principů nabíjení.

V další části jsou popsány testy prototypů solárních regulátorů a energetické bilance při jejich použití. Jsou zde zároveň porovnány výsledky jednotlivých možností nabíjení. Další kapitoly se zabývají obecně provozem fotovoltaického systému a správné volbě spotřebičů pro optimální provoz. Závěrečné kapitoly jsou věnovány koncepci prototypu solárního regulátoru na základě testů a závěrečné zhodnocení práce.

**Klíčová slova:** Fotovoltaické systémy (PV systémy), nabíjení akumulátorů, solární regulátor, metoda nabíjení na konstantní napětí, metoda nabíjení konstantním proudem, PWM regulace nabíjecího proudu, řízení spotřeby, energetické bilance.

### **Photovoltaic off-grid systems**

**Summary:** This diploma work is engaged in photovoltaic (PV) off-grid systems, mainly with theory about operation of these systems. Next part has contained practical measure from the experimental PV off-grid system, installed at the department of physics at CULS in Prague. The theoretical part of this work has described individual parts from PV off-grid system and practical using of this system in real operation. The practical part has described possible methods of accumulator charger and theory of charging tenets.

In the next chapters are described tests of solar regulators and energy balances. There are comparisons of solar regulators types too. Next chapter is focused on PV off-grid system operation and loads question for optimal operation. Lastly is presented conception of solar regulator prototypes.

**Key words:** Photovoltaic off-grid system, accumulator charging, solar regulator, constant voltage charging method, constant current charging method, PWM regulation of charging current, power management, energy balances.

## Obsah

1 Úvod.....	1
2. Stav problematiky: .....	4
2.1 Fotovoltaika a její uplatnění.....	4
2.2 Fotovoltaické panely: .....	7
2.3 Fotovoltaické systémy, ostrovní PV systémy .....	9
2.4 Dimenzování ostrovního fotovoltaického systému .....	11
2.5 Malé fotovoltaické systémy pro aplikace s malou spotřebou elektrické energie.....	15
2.6 Střední fotovoltaické systémy. ....	16
2.7 Velké fotovoltaické systémy. ....	18
3. Řešení malých ostrovních PV systémů .....	20
3.1 Autonomní PV systémy .....	20
4. Solární regulátory .....	27
4.1 Solární regulátor pracující v režimu nabíjení na konstantní napětí:.....	27
4.2 Solární regulátor pracující v režimu nabíjení konstantním proudem.....	36
4.3 Solární regulátor s řízením nabíjecího proudu pomocí PWM.....	44
4.4 Další funkce solárních regulátorů .....	48
4.5 Metoda MPPT .....	50
4.6 Určování stupně nabití .....	52
5. Spotřebiče v ostrovním PV systému .....	55
6. Vyhodnocení a diskuze k výsledkům pokusného ostrovního PV systému .....	56
6.1 Práce na ostrovním PV systému.....	56
6.2 Energetické bilance solárních regulátorů v ostrovním PV systému.....	56
6.3 Předimenzování ostrovního PV systému.....	59
6.4 Koncepce solárního regulátoru.....	59
7. Závěr práce .....	60
8. Seznam použité literatury .....	62
9. Seznam vyobrazení .....	63

*Často jsem slyšel lidi tvrdit, že něco takového jako bezplatný oběd tady není možné. Dnes se zdá, že samotný vesmír je takovým bezplatným obědem.* *ALAN GUTH*

## 1 Úvod

Spotřeba energie se všeobecně vyznačuje stále vzrůstajícím trendem. Ve vyspělých zemích je to vlivem rozmachu technických zařízení (myčky nádobí, klimatizace, výpočetní technika, zavádění průmyslové automatizace, náhrada manuální práce stroji atd.).

Celková výroba energie na Zemi vykazuje exponenciální nárůst a v roce 2000 již překročila hodnotu  $E = 10^{14}$  kW.h.rok<sup>-1</sup>. Při zachování současného trendu by za necelých 100 let dosáhla hodnoty  $E = 10^{17}$  kW.h.rok<sup>-1</sup>, tj. 1000krát větší! Vliv na spotřebu mají především země severní polokoule. Nárůst energetické potřeby je v současnosti velmi výrazný především v Číně a rovněž Indii. Současně se ale neustále zmenšují zásoby klasických zdrojů energie a roste porušování ekologické rovnováhy Země, jak tomu dosvědčují i závěry vědeckých a odborných konferencí (Předběžná zpráva Světové meteorologické organizace o stavu globálního klimatu v roce 2005 ŽENEVA, 15. prosince 2005, Konference o klimatu, Paříž 2007). Je proto třeba zaměřit pozornost výzkumu a vědeckotechnického vývoje směrem ke zdrojům, které neznečišťují životní prostředí, či toto znečištění minimalizují a je jich dostatek pro budoucnost. Ideálně použít jako zdroj energie látku, která je v dlouhodobém časovém horizontu nevyčerpatelná, buď svou podstatou – vodík, solární záření; nebo obnovitelností – biomasa.

Nejvhodnější formou vyrobené energie je elektrická energie, která je vhodná pro svůj snadný transport a snadnou transformaci na jiný druh energie (např. mechanickou, tepelnou). K výrobě elektrické energie se v současnosti využívají především: hnědé uhlí, černé uhlí a uran- v elektrárnách velkých výkonů (stovky až tisíce MW); hydro-(desítky až stovky MW/blok); zemní plyn, větrná energie, spalování biomasy, centrály s palivovými články (desítky až stovky kW). V současnosti je prováděn též výzkum jaderné fúze jako

potenciálního zdroje energie pro budoucnost s výkonem srovnatelným s jadernými elektrárnami a prakticky neomezenou zásobou paliva - deuteria.

Většina množství elektrické energie je dnes vyráběna z neobnovitelných zdrojů, převážně hnědého a černého uhlí a ropných produktů. Situace v české republice v roce 2007 je popsána v tabulce 1.1 [1]:

**Tab.1.1** podíl zdrojů energie na výrobě elektřiny v ČR

Zdroj	podíl
Hnědé uhlí	49%
Černé uhlí	7%
Plynná paliva	4%
Kapalná paliva	2%
Jaderné palivo	33%
Obnovitelné zdroje	5%

Takovéto využívání neobnovitelných zdrojů vede jednak k znečišťování atmosféry Země a jednak vyčerpává zásoby těchto zdrojů, která jsou mimo jiné třeba pro chemický průmysl, farmaceutický průmysl a mnoho jiných odvětví. Pro názornost, uhlí se spaluje milionkrát rychleji než se tvoří. O omezeném množství vypovídá tabulka 1.2 popisující odhadované množství neobnovitelných zdrojů energie [1]. Zajímavé jsou odhady zásob uranu, jelikož ještě nedávno byla jaderná energie získávaná z uranu považována za neomezený zdroj čisté energie budoucnosti.

**Tab. 1.2** Odhadované zásoby neobnovitelných zdrojů energie

Zdroj	Vytěžení paliva *)
ropa	50 let
zemní plyn	60 let
uhlí	250 let
uran	90 let **)

Pozn.: \*) vypočteno ze současné známých těžitelných zásob a roční spotřeby

\*\*) při přepracování paliva je doba 140 let, využití v rychlých reaktorech s přepracováním paliva 5000 let.

Výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů je především z vodních elektráren a větrných elektráren, rozvíjí se využití technologie spalování biomasy. Prozatím je ale podíl obnovitelných zdrojů na výrobě elektrické energie malý. Jeho navýšení si žádá směrnice Evropské unie požadující podíl obnovitelných zdrojů ve výrobě elektrické energie pro rok 2010 v průměru 12% ! [1]. Současné zastoupení obnovitelných zdrojů energie v ČR je zobrazeno v tabulce 1.3.

*Tab. 1.3 Zastoupení obnovitelných zdrojů energie pro ČR pro rok 2007 (zdroj MŽP).*

Druh obnovitelných zdrojů energie	Elektřina (GWh)	Tepel. energie (PJ)
Větrná energie (VěE)	4	-
Vodní energie (MVE <10 MW)	750	-
Velké VE (>10 MW) <sup>1)</sup>	1 165	-
Solární tepelné systémy	-	0,4
Fotovoltaické systémy	0,03	-
Geotermální energie <sup>2)</sup>	0	0,2
Energie biomasy	420	22
Biopaliva motorová	-	2,5
<b>Celkem</b>	<b>2 339</b>	<b>25,1</b>

Díky současněmu malému využití obnovitelných zdrojů jsou často nazývány více než výmluvně- alternativní. Většímu využití obnovitelných zdrojů brání především jejich malý výkon a mnohdy vysoká pořizovací cena. U zdrojů s dostatečným výkonem za rozumnou cenu jsou naopak často vyčerpány možnosti, jako např. u velkých vodních elektráren. Největším problémem je ale laxnost přírodních organizací a civilizace jako takové. Pohodlnější je využívat do vyčerpání současné zaběhlé trendy a nepouštět se na tenký led k poznání nových možností získávání energie. Problém vyčerpání těchto zdrojů je však nutné řešit s předstihem, bez ohledu na lobby od nadnárodních, především ropných a uhelných společností jež nemají důvody k tomuto prosazování.

Cílem této diplomové práce je sestavení a testování ostrovního PV systému, se zaměřením na činnost a porovnání několika typů solárních regulátorů.



## 2. Stav problematiky

### 2.1 Fotovoltaika a její uplatnění

Jednou z forem získávání energie z obnovitelných zdrojů je fotovoltaika. Využívá se zde fotovoltaického jevu polovodičů (viz. následující kapitola) při kterém je energie slunečního záření transformována na elektrickou energii. Z hlediska získávání energie se jedná o nejčistší a nejspolehlivější zdroj energie, což je dáno absencí pohyblivých částí. Životnost PV panelů je min. 20 let s minimálním poklesem účinnosti (monokrystalické a polykrystalické PV články). Tento zdroj je bez emisí, hluku, zápachu a dalších negativ ovlivňujících okolí, což tento zdroj stále častěji předurčuje jako důležitý prvek architektonického a urbanistického plánování. Jako příklad lze uvést např. střechy či parapety z fotovoltaických (dále PV) panelů, PV panely jsou využívány v protihlukových stěnách či jako součást dekorace staveb a v mnoha a mnoha dalších případech. Určitou ekologickou a energetickou zátěží je samozřejmě výroba PV panelů.

Značnou nevýhodou je naopak malý poměr výkon/cena, který činí tento zdroj energie drahý oproti jiným zdrojům a v porovnání s elektrorozvodnou sítí. Další podstatnou nevýhodou je produkce elektrické energie v závislosti na slunečním záření, tudíž její absence v obecně energeticky náročnějších obdobích, jak denních (noc), tak ročních (zimní období).

Řešením, kterému je v současnosti věnováno mnoho pozornosti a výzkumného úsilí (včetně vědecké činnosti na katedře fyziky ČZU v Praze) je zvyšování účinnosti PV systémů, které by jednak zvýšilo technický potenciál využití solárního zdroje a dále snížilo cenu na jednotku výkonu tj. zvýšilo ekonomický potenciál tohoto zdroje (viz. dále). Tato řešení mohou být *přímá*, což je v podstatě zvýšení účinnosti PV panelů, nebo *nepřímá* spočívající např. v koncentraci slunečního záření na plochu PV panelu z větší sběrné plochy, dále využití polohovacích a sledovacích systémů apod.

Obecně se jedná o přiblížení se *teoretickému potenciálu*, který pro v ČR představuje 90.000 TWh<sub>el</sub>/rok. Odvození solárního výkonu dopadajícího na povrch země je podrobně uvedeno např. v [2]. Pro porovnání, spotřeba elektrické energie v ČR byla pro rok 2006 cca 63 TWh<sub>el</sub>, tj. 0,07% teoretického potenciálu solární energie pro ČR.

*Technický potenciál* uvažující účinnost PV přeměny, reálné klimatické podmínky pro ČR a dosažitelnost ploch je podstatně menší. Tzv. *dostupný potenciál* uvažující dále i reálné možnosti umístění PV systémů v souladu s ekologickými, architektonickými a dalšími hledisky, je opět menší. Tabulka 2.1 uvádí odhadovaný technický a dostupný potenciál pro

ČR podle studie Asociace pro využívání obnovitelných zdrojů. Tato studie kalkuluje s vhodnými zastavěnými plochami zmenšenými o plochy potřebné pro fototermitické systémy.

**Tab. 2.1** *Technický a dostupný potenciál výroby el. energie ze Slunce*

potenciál	plocha celkem m <sup>2</sup>	inst. výkon MWe	výroba GWhe / rok
technický	210 000 000	22 000	23 000
dostupný	50 200 000	5 300	5 500

Jak je patrné z výše uvedené tabulky, dostupný potenciál výroby el. energie činí cca 8,7% spotřeby elektrické energie v ČR. Elektrické energie z PV systémů proto nemůže plně suplovat současné zdroje energie, nehledě na časovou nestálost tohoto zdroje. Společně s dalšími významnými obnovitelnými zdroji (vodní elektrárny, větrné elektrárny, biomasa, bioplyn) se však může stát společně s jadernou energetikou (v budoucnosti patrně s využitím termonukleárních elektráren) řešením energetické situace budoucnosti.

Význam fotovoltaiky je ale značný i přes výše zmíněné nevýhody, zvláště v zemích s dostatkem slunečního záření, a lze v budoucnu očekávat stále větší integraci především do architektury budov, kde je vhodným prvkem v současném trendu architektury skla. V zemích kde je pak dotační politika na fotovoltaické systémy, lze ve značné míře pozorovat výstavbu malých a středních fotovoltaických elektráren, jmenovitě výkonu v řádu desítek až stovek kW<sub>e</sub>, dodávajících vyrobenou elektrickou energii po náležitých úpravách do veřejné elektrorozvodné sítě.

Uplatnění fotovoltaiky dnes nabývá svého významu především v odlehlých místech s absencí elektrorozvodné sítě. Vybudování této sítě je často nákladnější nežli pořizovací cena fotovoltaického systému, ne-li nemožné. Zde pak fotovoltaika nachází své uplatnění, buď jako samostatný zdroj, nebo v součinnosti s jiným komplementárním zdrojem energie, např. větrné elektrárny, vodní elektrárny, agregáty, kogenerační jednotky apod.

Vzhledem k velké životnosti, vysoké spolehlivosti s minimální nutností údržby a nulovým provozním nákladům je vhodné řadit tento zdroj jako primární, další zdroje pak jako bivalentní. Bivalentní zdroje rovněž slouží k pokrývání dodávek energie v čase menší či nulové intenzity osvětlení, čímž odstraňují přední nedostatek systémů s PV zdroji energie – časovou nestálost vlivem proměnné intenzity dopadajícího slunečního záření.



**Obr.1**

*Stanice meteorologické služby napájená pomocí PV ostrovního systému.  
Rakouské Alpy.*

Je-li PV zdroj energie jediný, či hlavní, a je nutné zajistit rovnoměrné dodávání energie po určité časové období popř. nepřetržitě, je nutné elektrickou energii z PV zdroje akumulovat. Pro malé a střední fotovoltaické systémy s nutností akumulace energie je technicky

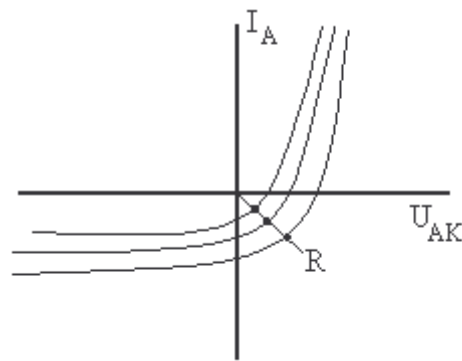
vhodné energii akumulovat v akumulátorech. PV systém s akumulací energie schopen dodávat energii v kterýkoliv okamžik, popř. nepřetržitě a je nezávislý na externích zdrojích energie (pochopitelně mimo slunečního záření) se nazývá *Ostrovní fotovoltaický systém*, (v anglické literatuře Off-grid photovoltaics system).

V některých speciálních aplikacích PV systémů lze jako zdroj elektrické energie využít pouze PV panely bez nutnosti akumulace. Typickým příkladem je systém pro čerpání užitkové či zavlažovací vody. Při čerpání zavlažovací vody se vychází z logiky, že největší potřeba této vody je v slunečních obdobích, kdy je zároveň elektrické energie z PV panelu(ů) dostatek. Naopak při oblačnosti či v nočních hodinách je odpar vody minimální a není tedy potřeba zavlažovací vody. V případě užitkové vody pak lze v období s dostatkem energie z PV panelu(ů) načerpat dostatečné množství vody a akumulovat ji ve výše situovaných zásobnících, odkud pak je samotíž distribuována k místu odběru. Svou podstatou se jedná o akumulaci v podobě potenciální energie vody.

Současná situace fotovoltaiky je podrobněji popsána v mnoha publikacích jako např. [3].

## 2.2 Fotovoltaické panely

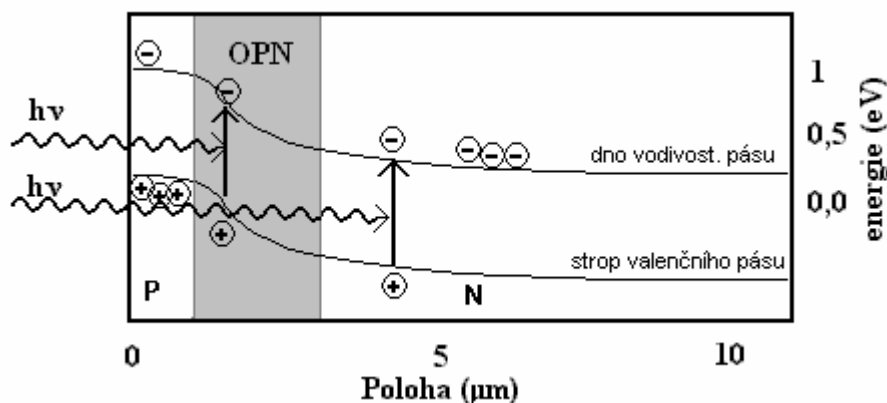
Fotovoltaické články transformují kinetickou energii částic (v naprosté většině fotonů) na elektrickou energii. Dnes nejvyužívanější způsob je využít k této přeměně PN přechod polovodiče, experimentuje se i s dalšími způsoby, např. výroba elektřiny v umělých buňkách na principu fotosyntézy. Standardní křemíkový fotovoltaický článek je velkoplošná dioda pracující ve čtvrtém kvadrantu (viz. obr. 2.) volt-ampérové charakteristiky (tj. má vlastnost zdroje elektrické energie).



**Obr. 2.**

*Voltampérová charakteristika osvětleného fotovoltaického článku (pro tři různé intenzity osvětlení)*

Tloušťka článku bývá obvykle kolem  $0,2 \div 0,3\text{mm}$ . Postačuje to k požadavku, aby co nejvíce záření o energii  $h\nu > E_g$  bylo absorbováno v oblasti prostorového náboje přechodu PN, kde  $h$  je Planckova konstanta,  $\nu$  je frekvence záření a  $E_g$  je šíře zakázaného pásu. Absorpcí fotonu s energií  $h\nu > E_g$  dochází ke generaci páru díra-elektron. Případný přebytek energie fotonu nad potřebnou energií šířky zakázaného pásu  $\Delta E_g$  je předán kmitům krystalové mřížky, čímž dochází k ohřevu polovodiče (fotovoltaického článku). Elektron generovaný v oblasti prostorového náboje, je elektrickým polem v této oblasti urychlen směrem do polovodiče typu N. Tam se přidá k elektronům generovaným v této oblasti. U díry je tomu naopak, je urychlena do polovodiče typu P. Znázorněno je to na obrázku 3.



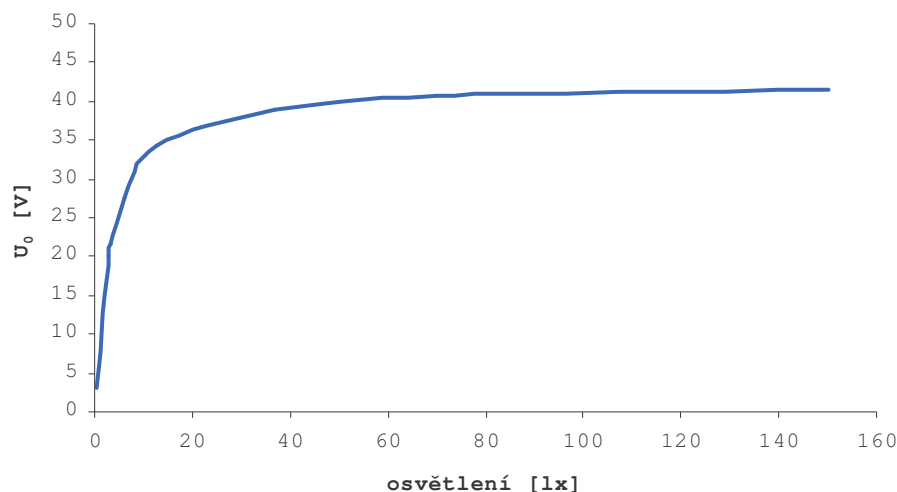
**Obr. 3**  
*Sklon energetických hladin v křemíku*

Jsou-li elektrony (díry) generovány v oblasti P (N), na vzdálenosti difúzní délky od oblasti prostorového náboje, dostanou se do ní difúzí též. Ostatní elektrony (díry) poté časem rekombinují, vytvoří se rovnovážný stav mezi generací a rekombinací. Rekombinační a termální proud je v polovodiči v rovnováze.

Není-li osvětlený článek zapojen v elektrickém obvodu, hromadí se elektrony v oblasti N a díry v oblasti P, čímž dochází k nerovnováze mezi proudy termálním a rekombinačním. Vzniká tak rozdíl potenciálů, tedy elektrické napětí. Výše popsanému jevu se říká fotovoltaický jev.

Po zapojení osvětlených článků do elektrického obvodu se zátěží se článek stává zdrojem elektrické energie. Z voltampérové charakteristiky je patrné, že se vzrůstajícím proudem v generátorickém režimu klesá napětí článku nelineárně.

Výkon dodávaný článkem je závislý na intenzitě osvětlení. Proud na krátko závisí přibližně lineárně na intenzitě osvětlení, napětí závisí přibližně logaritmicky na intenzitě osvětlení. Závislost napětí na prázdno v závislosti na intenzitě osvětlení je na obr.4. Z tohoto grafu je zřejmá lineární závislost fotovoltaického napětí na intenzitě osvětlení při slabých intenzitách, se zvyšující se intenzitou osvětlení je původní bariéra PN přechodu průchodem většího počtu nosičů odstraněna a fotovoltaické napětí je tak shora omezeno.



**Obr. 4**  
Závislost napětí na prázdko na osvětlení

Maximální napětí jednoho přechodu PN Si struktury je cca 0,6V, proud je dán plochou přechodu PN. Pro zvýšení napětí se články řadí do sériového zapojení na hodnotu jmenovitého napětí při daném osvětlení (uvedeno v katalogovém listu výrobku) které je typicky 6, 12, 24, 48V, případně i jiné. Maximální plocha jednoho článku je omezena výrobní technologií, proto dochází i na paralelní řazení článků pro dosažení požadovaného proudu při jmenovitém napětí, resp. Dosažení jmenovitého výkonu. Sérioparalelně uspořádané články jsou na společné podložce, průhledné či neprůhledné, z vrchu překryté průhlednou vrstvou skla či plastu a z boku opatřeny rámem ve většině případech z hliníku či duralu pro zpevnění konstrukce a možnosti uchycení. Toto uspořádání se nazývá PV panel.

Dle typu použitých článků dělíme PV panely na: amorfnní, polykrystalické, monokrystalické. Amorfnní PV panely se vyznačují vyšším napětím naprázdno ( $U_{OC}$ ) i při menší intenzitě osvětlení a menší účinností na plochu kolektoru. Rovněž jejich životnost (ztráta účinnosti s časem) je oproti PV panelům na bázi monokrystalického či polykrystalického křemíku nižší. Vhodné jsou tak pro aplikace s malým odběrem el. energie, kde je třeba zajistit napájení i při nepříznivých slunečních podmínkách.

### 2.3 Fotovoltaické systémy, ostrovní PV systémy

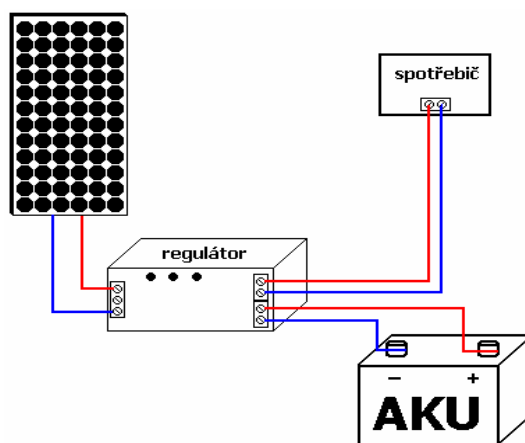
PV panel slouží jako primární zdroj elektrické energie. Pro využití této energie k dalšímu využití je třeba dalších technických prostředků. PV panel s těmito prostředky umožňujícími

využití elektrické energie z PV panelu nazýváme *fotovoltaický systém*. V principu můžeme rozdělovat tyto systémy podle mnoha kritérií. Např. podle výkonu, použitých PV panelů, na systémy se sledovači Slunce a stabilní, na fotovoltaické systémy *síťové* (dodávající energii do veřejné elektrorozvodné sítě), *ostrovní systémy síťové* (dodávající energii do lokální elektrorozvodné sítě) a *ostrovní systémy jednoduché*. První jmenovaný typ systému není středem zájmu této práce. Dále lze systémy dále dělit na ryze fotovoltaické systémy, či kombinované, ve kterých je využíváno bivalentního zdroje elektrické energie, popř. zde PV zdroj slouží jako bivalentní zdroj k jinému zdroji energie. V práci je uvažován ryze fotovoltaický systém (PV systém).

Ostrovní PV systémy jsou specifické tím, že slouží k napájení aplikací elektrickou energií vyrobenou pouze ze slunečního osvětlení. Základní schéma tohoto systému je na obr. 5.

Základní části jsou:

- 1) **Fotovoltaický panel** specifického typu, napětí a výkonu
- 2) **Akumulátor** pro akumulaci elektrické energie pro spotřebič pro dobu se slabou či nulovou intenzitou dopadajícího slunečního záření
- 3) **Regulátor**, kterým může být v nejjednodušším případě nabíječka. Standardně jsou dnes regulátory vybaveny i funkcí ochrany akumulátoru a mnoha dalšími funkcemi podle požadovaných kritérií
- 4) **Spotřebič**, kterým může být systém s občasnou či trvalou spotřebou elektrické energie.



**Obr. 5**

*Jednoduché schéma ostrovního fotovoltaického systému*

Dále je možné použít PV systém s dalšími komponenty, jako např. GSM jednotkou pro informování o stavu systému, měniči pro úpravu velikosti a frekvence napětí (např. měničem



12VDC / 230VAC), inteligentní řízení více spotřebičů či subsystémů, jako např. vodního hospodářství atd.

Při současné situaci v oblasti řízení a mikroprocesorové techniky je většina více či méně důležitých funkcí řešena přímo regulátorem. Ten tak přestává být pouze ve funkci nabíječky, ale zastává řízení pro inteligentní nabíjení akumulátoru, ochrany proti přebíjení a hlubokému vybití akumulátoru. Dále je možné inteligentně spínat zátěže podle priority a s ohledem na množství energie v systému a mnoho dalších funkcí.

V poslední době je předním požadavkem na regulátory dobíjení práce s MPP- *Maximum Power Point*. Regulátor se snaží pracovat v blízkém okolí bodu maximální účinnosti PV panelu a tím se zvyšuje celková účinnost systému.

Elektrickou energií z PV panelu a akumulátoru může být napájen jeden spotřebič, či více spotřebičů s různými parametry odběru. Elektrickou energii je možné pomocí lokální sítě distribuovat v určité oblasti, jednak o napětí 12V, 24V 48 V apod. dle použitého akumulátoru a nebo pro snížení ztrát a větší komfort využít měnič napětí (co nejbližže akumulátoru) a využívat lokální síť 230V 50Hz.

## 2.4 Dimenzování ostrovního fotovoltaického systému

Dimenzování elektrického výkonu PV systému závisí na počátečních požadavcích a podmínkách. Je-li omezení ze strany plochy pro PV panely, popř. cenové omezení, lze systém dimenzovat pro určitý elektrický výkon. U ostrovních PV systémů je nejčastěji situace opačná. Podle známé spotřeby el. energie pro systém(y) je třeba dimenzovat zbylé části ostrovního PV systému, tj. akumulátor, PV panely a regulátor.

Pro vyjádření denního odběru el. energie je výhodné využít střední hodnotu denního odběru v jednotkách watthodin [W.h] popř. ampérhodin [A.h]. Příklad návrhu denní spotřeby je v tab. 2.2.

**Tab. 2.2** Přehled spotřebičů

Př. Aplikace 1: rekreační chata			
spotřebič	čas provozu	spotřeba	denní spotřeba
	(hod.)	(A)	(A.h)
radiopřijímač	5	0,5	2,5
televizor	3	2,5	7,5
osvětlení	5	2	10
ostatní spotřebiče	8	1	8
alarm	24	0,08	1,92
čerpání vody	2	4	8
Spotřeba celkem			37,92



Dále je třeba vzít v úvahu energetickou účinnost použitého akumulátoru(ů), účinnost napěťového měniče (je-li použit), účinnost regulátoru. Pojistný koeficient akumulace  $k$  zohledňuje skutečnost, že za jeden den musí být akumulátoru dodána energie na několik dní s malou intenzitou osvětlení. Tento koeficient může být v nejjednodušším případě 1, pro systémy s vysokým stupněm spolehlivosti se zvyšuje v závislosti na meteorologické situaci dané oblasti. Vyjádřeno vztahem:

$$E_d = \bar{E} \cdot \eta_{aku} \cdot \eta_{ch} \cdot \eta_{reg} \cdot k \quad (\text{W.h}) \quad (1)$$

kde význam členů je:  $\bar{E}$  - střední potřeba energie za den;  $\eta_{aku}$  - účinnost akumulace el. energie v akumulátoru;  $\eta_{ch}$  - účinnost měniče napětí;  $\eta_{reg}$  - účinnost solárního regulátoru;  $k$  - koeficient akumulace,

obdržíme energii, kterou je nutné systému dodat z PV panelů. Na tuto energii je třeba dimenzovat minimálně kapacitu použitého akumulátoru.

Údaj o střední hodnotě dodané denní energie je výchozí pro dimenzování výkonu solárního pole. Zde je důležitým výchozím parametrem, zda se jedná o solární pole PV panelů stacionárního typu nebo zda se jedná o systém sledování Slunce. Systém sledování Slunce lze dále dělit na systém s jednou osou sledování či se dvěma osami.

Výpočet energie solárního záření dopadající na plochu panelu vypočteme z energie dopadající na plochu PV panelu za den [2]:

Pro pevný (stacionární) systém:

$$E = \int_{-\frac{t}{2}}^{+\frac{t}{2}} I \cdot z \cdot S_0 \cdot \cos(\omega t) dt = \frac{2I \cdot S_0}{\omega} \quad (\text{W.h})$$

a pro systém obsahující sledovač Slunce (v jedné ose, druhá osa se předpokládá kolmá k trajektorii denního pohybu Slunce):

$$E = I \cdot z \cdot S_0 \cdot t \quad (\text{W.h})$$

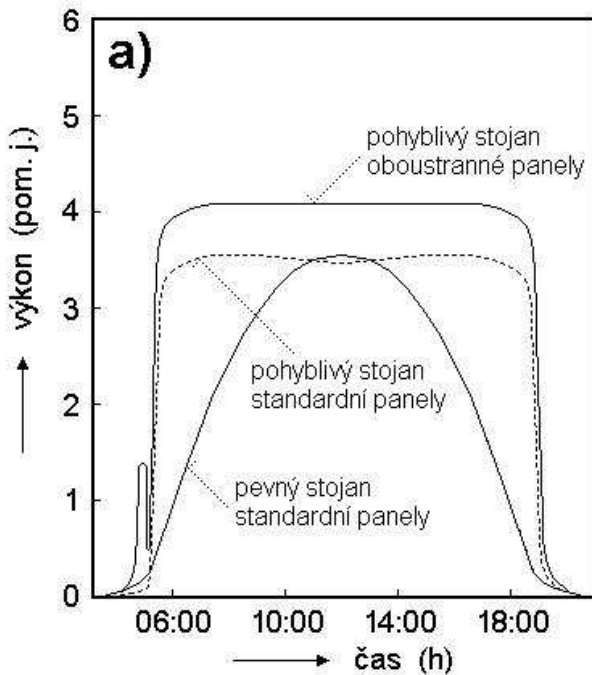
Plochu PV panelů s uvážením jejich  $\eta_{PV}$  účinnosti pak získáme ze vztahu:

$$S_0 = \frac{E \cdot \omega}{2 \cdot I \cdot z \cdot \eta_{PV}} \quad (\text{m}^2)$$

pro pevný systém, pro systém se sledovačem Slunce pak:

$$S_0 = \frac{E}{I \cdot z \cdot t \cdot \eta_{PV}} \quad (\text{m}^2)$$

Tuto teoretickou plochu je třeba v praxi konfrontovat s podmínkami v místě aplikace, jako jsou např. stavební projekt, dispozice volných ploch, zastíňující objekty, dostupnost pro údržbu apod.



**Obr. 6**  
Idealizovaná závislost výkonu PV systému v průběhu dne

účinnosti PV panelu jinými faktory, např. prašnost v daném místě. Tento koeficient lze vyjádřit na základě dlouhodobého pozorování jeho střední hodnotou  $\bar{z}$ .

Dimenzování akumulátoru spočívá ve volbě kapacity akumulátoru. Akumulátor musí být schopen pojmout energii  $E_d$  (viz. (1)). Při známém jmenovitém napětí PV systému  $U$  je minimální kapacita akumulátoru:

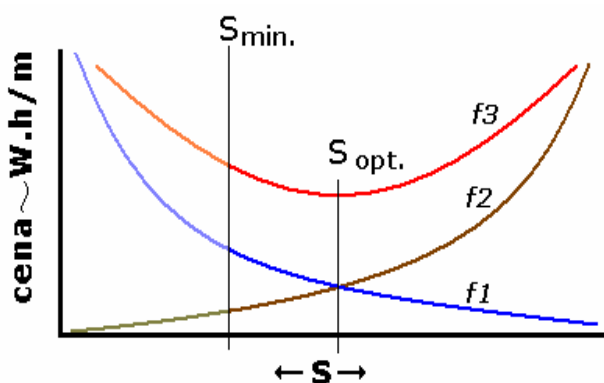
$$C_{\min} = \frac{E_d}{U} \quad (\text{A.h})$$

*Pozn.: Vzhledem k faktu, že jmenovité napětí PV systému lze považovat za konstantní, lze celý proces dimenzování PV systému provádět v jednotkách (A.h).*

Z předchozího textu je patrné, že významný energetický a ekonomický vliv mají především účinnost PV panelu  $\eta_{PV}$  a použití či nepoužití sledovačů Slunce. Zobrazení grafu výkonu PV panelu v průběhu dne pro stacionární systém a systém se sledovačem Slunce je na obr. 6. Částečně ovlivnit můžeme i parametr  $z$ , ( $z=f(t)$ ;  $z < 1$ ), který zohledňuje jednak meteorologickou situaci během dne, tj. útlum slunečního záření vlivem oblačnosti a vodních par a dále závislost útlumu

slunečního záření na poloze Slunce na obloze. V případě potřeby může tento koeficient zastávat i útlum záření či popř. snížení

Dimenzování vodičů je třeba přizpůsobit především platným normám a bezpečnostním předpisům. Výchozím vztahem je pak výpočet minimálního průřezu vodiče pro maximální proud. Průřez se pak volí jako větší v řadě průřezů vodičů. Pro systémy s malou délkou vodičů je podmínka minimálního průřezu dostačující, ztráty ve vedení na malých vzdálenostech jsou zanedbatelné. Pro systémy s dlouhými úseky vedení lze najít optimum na základě jednoduché úvahy. Funkce  $f1$  (obr. 7) vyjadřuje snížení nákladů na metr délky vedení v závislosti na průřezu vodiče  $S$  v důsledku menší výkonové ztráty ve vedení. Funkce  $f2$  vyjadřuje zvýšení nákladů na metr délky vlivem ceny vodiče v závislosti na průřezu  $S$ . Funkce  $f3$  je součtová funkce  $f3 = f1 + f2$ . Minimum  $f3$  udává optimální průřez vodiče  $S_{opt.}$  vzhledem k nákladům. Stále zde platí podmínka, že minimální průřez  $S_{min.}$  je daný velikostí proudu.



Obr. 7

Nákladová funkce při dimenzování vodičů PV systémů

Důležitou součástí PV systému je jištění. Především zkratový proud akumulátoru dosahující hodnot stovek ampér je potenciální zdroj ohrožení osob a majetku. Je proto jištění akumulátoru třeba věnovat velkou pozornost. Jištění elektrické instalace v PV systému je dáno především technickými normami, dále pak požadavky či doporučením výrobců jednotlivých částí PV systému (měniče, regulátory, spotřebiče).

Do kategorie jištění spadá i přepěťová ochrana a ochrana před následky úderu blesku. I tato oblast spadá pod příslušné normy a doporučení výrobců. V současné době se jištění proti přepětí samozřejmostí.

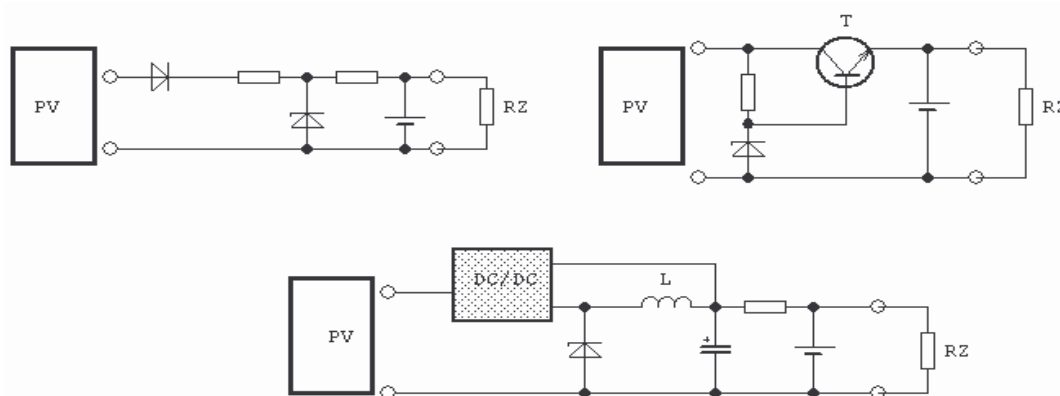
Obecně dimenzování PV systému musí podléhat platným technickým i ostatním normám.

## 2.5 Malé fotovoltaické systémy pro aplikace s malou spotřebou elektrické energie

Malé fotovoltaické systémy jsou často používány i v oblastech s dostupnou elektrorozvodnou sítí. Investice do těchto malých systémů může být menší než investice do připojení k elektrorozvodné síti (povolení, elektroměr, pravidelné revize).

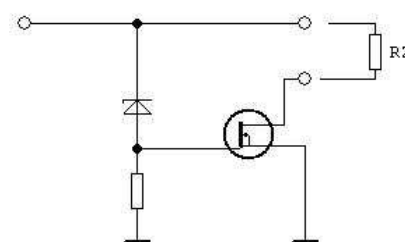
Malé PV systémy proto našly uplatnění jako signalizace pro slepce na městských komunikacích, malé měřicí a monitorovací stanoviště, napájení nestacionárních staveb (obr.1) apod.<sup>1</sup>

PV systém se zde sestává z PV panelu, dodávajícího energii do akumulátoru. Z akumulátoru je pak napájena dle potřeby aplikace. Jako akumulátory jsou často voleny NiCd, která snesou vysoký vybíjecí proud a nedojde k jejich poškození při hlubokém vybití. Dále jsou používány akumulátory NiMH a především akumulátory Li-ion. U akumulátorů NiCd a NiMH stačí jako regulátor nabíjení jednoduchý obvod omezující nabíjecí napětí a popř. nabíjecí proud. Některé z těchto obvodů jsou ve zjednodušeném zapojení na obr. 8.



**Obr.8** Jednoduché regulátory napětí

Akumulátory Li-ion jsou citlivé na nesprávné nabíjení, proto nabíjecí regulátor v PV systémech obsahuje speciální integrovaný obvod pro nabíjení těchto akumulátorů. Ten řídí jak proces nabíjení, tak zároveň slouží jako ochrana proti hlubokému vybití. Tuto ochranu je vhodné zajistit rovněž pro systémy s akumulátory NiMH a NiCd. Její možné zapojení je zjednodušeně na obr. 9.



**Obr. 9**  
Princip ochrany  
akumulátoru proti  
hlubokému vybití

<sup>1</sup> Přesná definice dělení PV systémů není zavedena. Pro orientaci a použití v této práci se předpokládají malé PV systémy s výkonem PV panelů do 100W, střední systémy od 100W do 1kW, velké systémy nad tuto hodnotu. Toto dělení vychází z přístupu k energetickému řešení systémů.

S rozmachem použití fotovoltaiky jako zdroje napájení u malých aplikacích (v řadě případů je fotovoltaika jediným zdrojem napájení) se některé přístroje konstruuji již přímo pro tento druh napájení a regulace nabíjení je obsažena již v obvodovém řešení tohoto přístroje (viz. obr 10).



**Obr.10**  
*Indikátor 753R pro  
bezdrátovou komunikaci  
s PV napájením*

Tyto PV systémy lze rozlišovat z hlediska spolehlivosti na systémy s vysokým stupněm spolehlivosti a systémy s nízkým stupněm spolehlivosti. Podle tohoto členění je nutno dimenzovat výkon PV panelu, akumulátoru a dalších částí PV systému. Vzhledem k povaze těchto systémů odpadá možnost napájení z bivalentního zdroje. Proto je u systémů s vysokým stupněm spolehlivosti nutné věnovat dimenzování patřičnou pozornost a systém patřičně předimenzovat.

## 2.6 Střední fotovoltaické systémy

Ostrovni PV systémy větších výkonů, řádově stovky wattů, jsou instalovány k napájení autonomních zařízení. Zde slouží jako jediný zdroj energie, či ve spolupráci s dalším zdrojem (elektrocentrála, vodní či větrná elektrárna). Tyto PV systémy zažívají vzestup i v oblastech s elektrorozvodnou sítí, kde slouží jako podpůrný zdroj energie či jako samostatný zdroj energie (kde je elektrická energie dodávána jako obnovitelný zdroj do elektrorozvodné sítě za vyšší výkupní sazbu). Časté je rovněž použití PV systémů k napájení např. záložních systémů (UPS). Zde PV systém poměrně malého výkonu udržuje akumulátory záložního napájení v připraveném stavu a v případě dlouhodobého výpadku elektrické energie je pomocí řídicí automatiky z PV systému napájeno několik vybraných důležitých zařízení (např. zabezpečovací zařízení, datové spojení apod.).

Přístup k řešení středních PV ostrovních systémů (jež jsou zájmem této práce) je odlišný od řešení malých PV systémů. Především zde již nelze s ohledem na cenu PV panelů a dalších zařízení několikanásobně předimenzovat systém. V úvahu zde může být i omezená vhodná zástavní plocha pro PV panely. Dimenzování je třeba věnovat patřičnou pozornost. Především zvolením správného umístění PV panelů, a odhadnutí vhodných koeficientů  $k$  a  $z$

(viz. kap. 2.4). Rovněž se zde začínají uplatňovat zařízení a metody sloužící k navýšení celkové účinnosti PV systému.

Návrh těchto systémů je vždy s ohledem na několik parametrů. Mezi nejvýznamnější patří: požadovaný výkon PV systému (příkon spotřebičů), denní zatížení PV systému, roční využití, cena systému, plocha pro PV kolektory a jejich orientace, spolehlivost atd.

V souladu s kapitolou 3.3 je nutné znát především příkon spotřebičů a jeho denní rozložení. Dále pak roční využití. Z těchto informací se stanoví koeficienty  $k$  a  $z$  a vypočte se požadovaný počet a typ PV panelů. Ty mohou být jednak standardní stabilní, nebo s využitím tzv. sledovače Slunce, kde se dosahuje určitého navýšení výkonu (pojednáno podrobněji o této problematice je např. v [2]). Ve středních systémech je význam návrhu průřezů vodičů již v některých případech nutný. Velkou roli zde hrají regulátory dobíjení, které obstarávají buď přímo, nebo pomocí pomocných modulů téměř všechny funkce automatiky dobíjení akumulátorů z PV panelů a distribuce elektrické energie ke spotřebičům. Od samotného nabíjecího procesu, přes ochrany akumulátoru proti přebití, hlubokému vybití, sulfataci desek až k funkcím „přednostního relé“ (zajišťování přednostní dodávky pro vybrané spotřebiče) a např. nadproudových ochran, tzv. elektronických pojistek.

Regulátory mohou být mnoha typů. Od analogových pracujících na jednoduchém principu, přes jednoduché s řízením velikosti nabíjecího proudu, až po zákaznický vyvíjené aplikace velmi široké palety funkcí. Regulátorům dobíjení ve středních PV ostrovních systémech bude věnováno několik příštích kapitol.

Důležitou součástí středních PV ostrovních systémů jsou akumulátory. Akumulace energie je až na pár výjimek prováděna pomocí akumulátorů. Od nich se požaduje vysoká spolehlivost při co nejmenší udržitelnosti a co největší účinnost akumulace el. náboje. V současné době jsou nejpoužívanějšími typy olověné staniční akumulátory, často s malými úpravami prodávané speciálně pro solární aplikace. Výhodou těchto akumulátorů je řada jmenovitých napětí (6V, 12V, 48V) která jsou standardizována pro mnoho aplikací, velká kapacita, dlouhá životnost a schopnost dodání krátkodobě vysokých výkonů. Příležitostně a především pro sezónní aplikace (obr. 12) se využívají i olověné startovací akumulátory. Rychle se rozšiřující jsou v současnosti akumulátory Li-ion. Tyto akumulátory se vyznačují velkou kapacitou, spolehlivostí, a dlouhou životností. Jejich použití k akumulaci elektrické energie lze očekávat. Především díky výzkumu těchto akumulátorů v oblasti velkých výkonů (kW.h) pro automobilový průmysl.

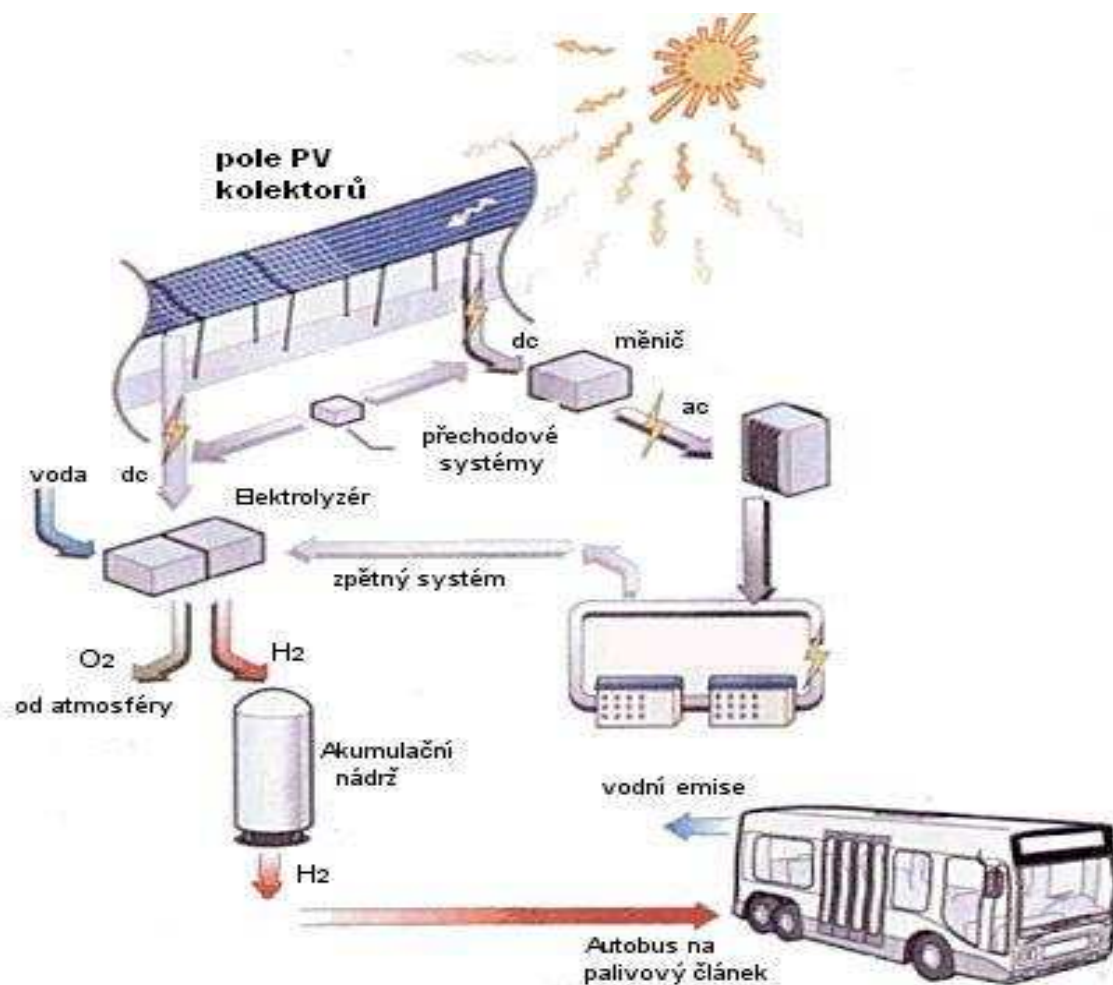
V těchto PV systémech lze v určitých případech využít i jiné typy akumulace, např. načerpáním vody do výše položeného zásobníku pro pozdější použití.



Střední PV aplikace jsou často připojeni na lokální či veřejnou elektrorozvodnou síť. Od malých „domácích aplikací“ o příkonu v řádu stovek W.h až po aplikace řádu kW.h.

## 2.7 Velké fotovoltaické systémy

S technickým a ekonomickým vývojem PV kolektorů a v mnoha zemích i díky dotační politice, se začíná fotovoltaika začleňovat mezi komerčně projektované elektrárny. Právě díky vyšším výkupním cenám elektrické energie z tohoto obnovitelného zdroje, situuje PV zdroje velkých výkonů mimo oblast autonomního zásobování el. energií do oblasti obnovitelných zdrojů, dodávajících elektrickou energii do distribuční sítě. V současné době se na trhu (evropském i českém) nachází mnoho firem, zabývajících se návrhem, realizací, provozem a i financováním PV elektráren. V ČR jsou aplikace většinou o výkonu desítek až stovek kW<sub>el.</sub>, aplikace v Evropě jsou i výkonu řádu MW<sub>el.</sub>. V zájmu této práce jsou ostrovní PV systémy, které se též realizují o výkonech řádově desítek až stovek MW<sub>el.</sub> zmíněny velmi okrajově.



Obr. 11

Nákres systému využívajícího akumulace energie z PV kolektorů do vodíku

Ostrovní systémy o velkém výkonu nejsou tvořeny výhradně z PV zdrojů elektrické energie. Tyto zdroje zde mohou sekundovat (ve větší či menší míře) ale jejich závislost na slunečním záření (dle denní doby a meteorologických podmínek) by kladla neúnosné podmínky na akumulaci velkého množství energie. Jako možnosti by zde přicházely v úvahu akumulace do hydropotenciálu (přečerpávací elektrárna) popř. technologie vodíkového hospodářství, která se začíná v současnosti průmyslově uplatňovat. Obě řešení jsou ale technologicky náročná.

Zmíněná možnost akumulace elektrické energie do vodíku se jeví jako jedna z velmi uvažovaných metod akumulace energie z PV kolektorů. Elektrolýzou vody pomocí ss proudu z PV panelů by se získal vodík a kyslík. Vodík po chemickém vyčištění by mohl být skladován, ať již pod tlakem či pomocí absorpční látky, a transportován a skladován k dalšímu použití. Jím by mohlo být především využito jako paliva v palivových článcích. Tímto modelem se zabývá mnoho odborných i vědeckých studií. Bohužel je zde stále mnoho problémů, souvisejících s narušováním ozónu unikajícím vodíkem, účinnostmi čistících a zkapaňujících technologií a v neposlední řadě cena membrán pro palivové články na vodík.

Na obr. 11 je obrázek pokusného uspořádání využívající akumulace el. energie z PV kolektorů do vodíku.



**Obr.12**  
*Akumulace el. energie do akumulátoru  
v mobilním dopravním systému*

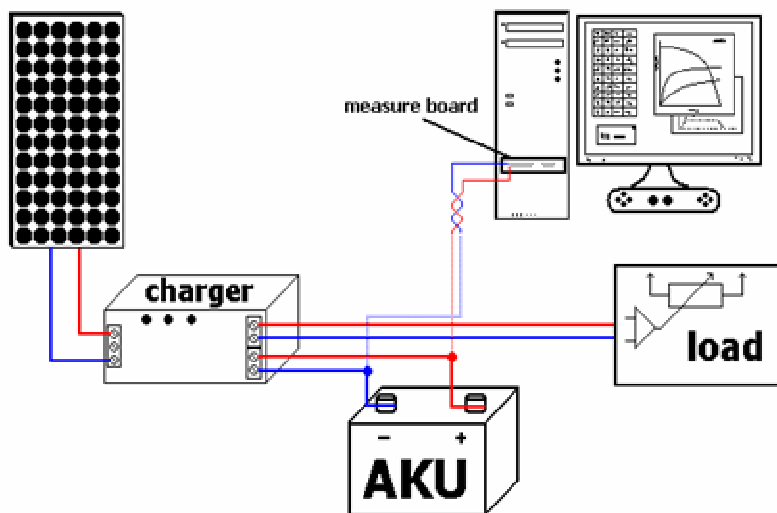


### 3. Řešení malých ostrovních PV systémů

#### 3.1 Autonomní PV systémy

V rámci výzkumného projektu byl na katedře fyziky TF ČZU v Praze vybudován PV systém. Prvotním záměrem byl výzkum navýšení výroby elektrické energie v PV systému použitím sledovače Slunce Traxle™. V roce 2002 byl zahájen na instalovaném PV systému výzkum autonomních PV systémů, též zvaných ostrovní PV systémy. Uspořádání tohoto systému je na obr. 13.

Cíl systematického výzkumu, jehož součástí je i tato diplomová práce, lze rozdělit do několika základních bodů:



**Obr. 13**

*Uspořádání pokusné sestavy ostrovního PV systému na katedře fyziky TF ČZU v Praze*

- 1) Vývoj a výzkum solárních regulátorů vhodných pro dlouhodobý provoz v autonomním PV systému na odlehlých stanovištích pro aplikace s malým či příležitostným odběrem el. energie.
- 2) Vývoj a výzkum solárních regulátorů vhodných pro dlouhodobý provoz v autonomních PV systémech na odlehlých stanovištích pro aplikace s velkým či nepřetržitým odběrem el. energie.
- 3) Výzkum a vývoj solárních regulátorů s vysokou účinností a spolehlivým provozem s ochranou akumulátoru proti nežádaným stavům.
- 4) Sledování vlivu solárních regulátorů na životnost a spolehlivost nabíjeného akumulátoru.
- 5) Porovnání účinnosti nabíjení jednotlivých typů solárního regulátoru.
- 6) Zvyšování účinnosti celého ostrovního PV systému a jeho dílčích částí.

Z obrázku 13 jsou patrné základní části ostrovního PV systému. Jsou to: PV panel, regulátor nabíjení, akumulátor, spotřebič a pro potřeby výzkumu měřící karta, popř. další samostatné

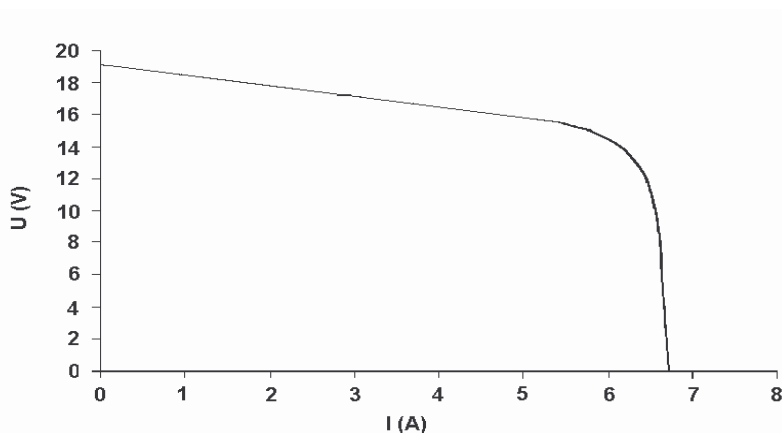
měřicí přístroje. Měřicí karta monitoruje během provozu vybrané parametry PV systému, určené pro analýzu nabíjení.

PV systém obsahuje:

- PV panel na bázi monokrystalického křemíku, 12V / 100W
- Startovací olověný akumulátor Dynalite 12V 44A.h <sup>1)</sup>
- Startovací olověný akumulátor Magnet 12V 55A.h <sup>1)</sup>
- Regulátor nabíjení
- Vybíjecí reostat
- Umělá zátěž pro vybíjení konstantním proudem
- Měřicí karta Tedia (8x analogový vstup)

<sup>1)</sup> Pozn.: V systému je používán vždy jen jeden z akumulátorů.

PV panel 12V/100W lze považovat za optimální zdroj elektrické energie pro malé PV systémy. Výkon 100W nelze ovšem technicky uvažovat, jedná se o špičkový výkon PV panelu stanovený v laboratorních podmínkách. Na obr. 14 je volt-ampérová charakteristika PV panelu změřená při jasném slunečním letním dni. Jedná se tedy o zatěžovací V-A charakteristiku PV panelu při konstantním osvětlení. (Podmínka konstantního osvětlení je důležitá, jak bude poukázáno



**Obr. 14**

*Volt-ampérová charakteristika PV panelu při jasném slunečním letním dni*

dále, intenzita dopadajícího záření je důležitým faktorem s velkým vlivem na napětí, proud a potažmo výkon PV panelu.)

Budeme-li charakteristiku aproximovat dle vztahu:

$$I = I_{SC} \left(1 - e^{-x(U_{oc} - U)}\right) \quad (A)$$

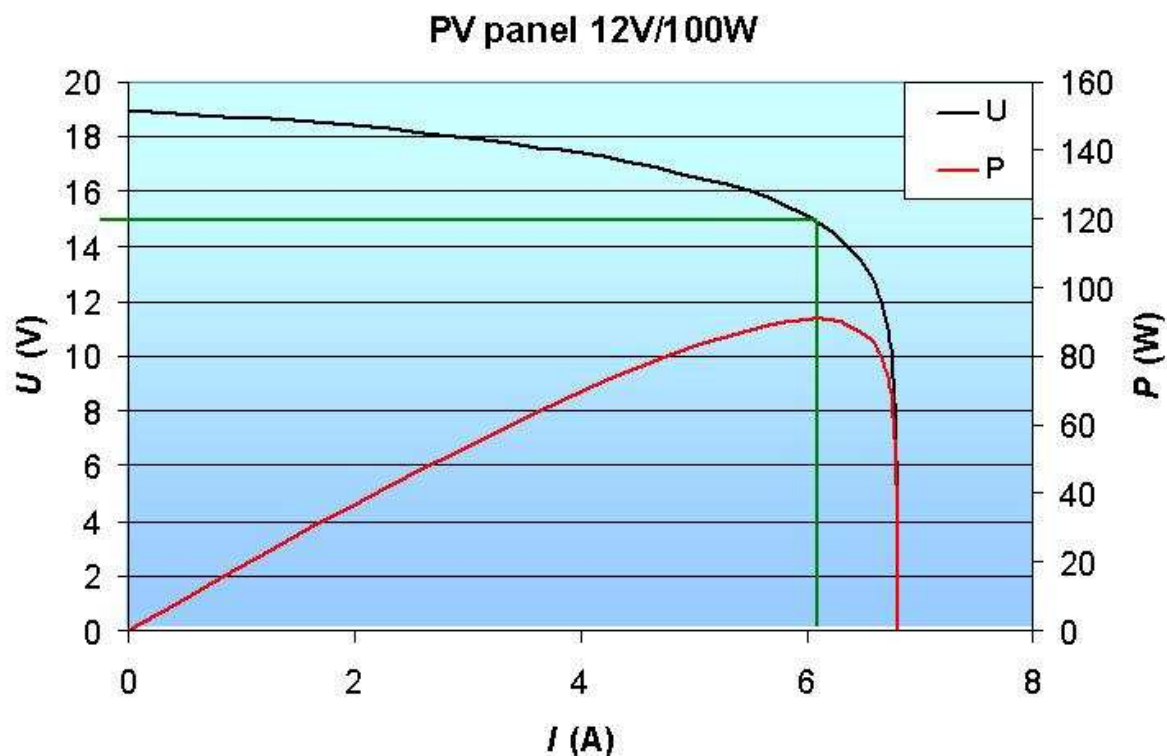
kde  $I$  je okamžitý proud,  $I_{sc}$  je maximální (zkratový) proud PV panelu při daném osvětlení,  $U$  je okamžité svorkové napětí PV panelu,  $U_{oc}$  je maximální napětí PV panelu (naprázdno) a  $x$  je koeficient stanovený z hodnot  $I_{sc}$ ,  $U_{oc}$  a optimálního pracovního napětí  $U_{PM}$  a optimálního pracovního proudu  $I_{PM}$  podle vztahu:

$$x = \frac{\log(1 - I_{PM} / I_{sc})}{U_{PM} - U_{oc}}, \quad (-)$$

můžeme vyjádřit inverzně závislost  $U = f(I)$  a závislost  $P = f(I)$ , resp.  $P=f(U)$ . Konstantu  $x$  můžeme vypočítat výše uvedeným vztahem při znalostech optimálních pracovních hodnot napětí a proudu PV panelu, nebo můžeme zvolit hodnotu  $x$  takovou, aby charakteristika (graf závislosti  $U = f(I)$ ) odpovídala co nejvíce naměřené reálné V-A charakteristice PV panelu. Upravením výše popsaného vztahu obdržíme vztah pro výkon PV panelu při daném osvětlení jako funkci napětí panelu  $U$ ,  $P=f(U)$ , tj.:

$$P = U \cdot I = U \cdot I_{sc} \left(1 - e^{-x(U_{oc} - U)}\right) \quad (\text{W}) \quad (2)$$

Závislosti  $P=f(U)$ ,  $U=f(I)$  jsou uvedeny na obrázku 15.

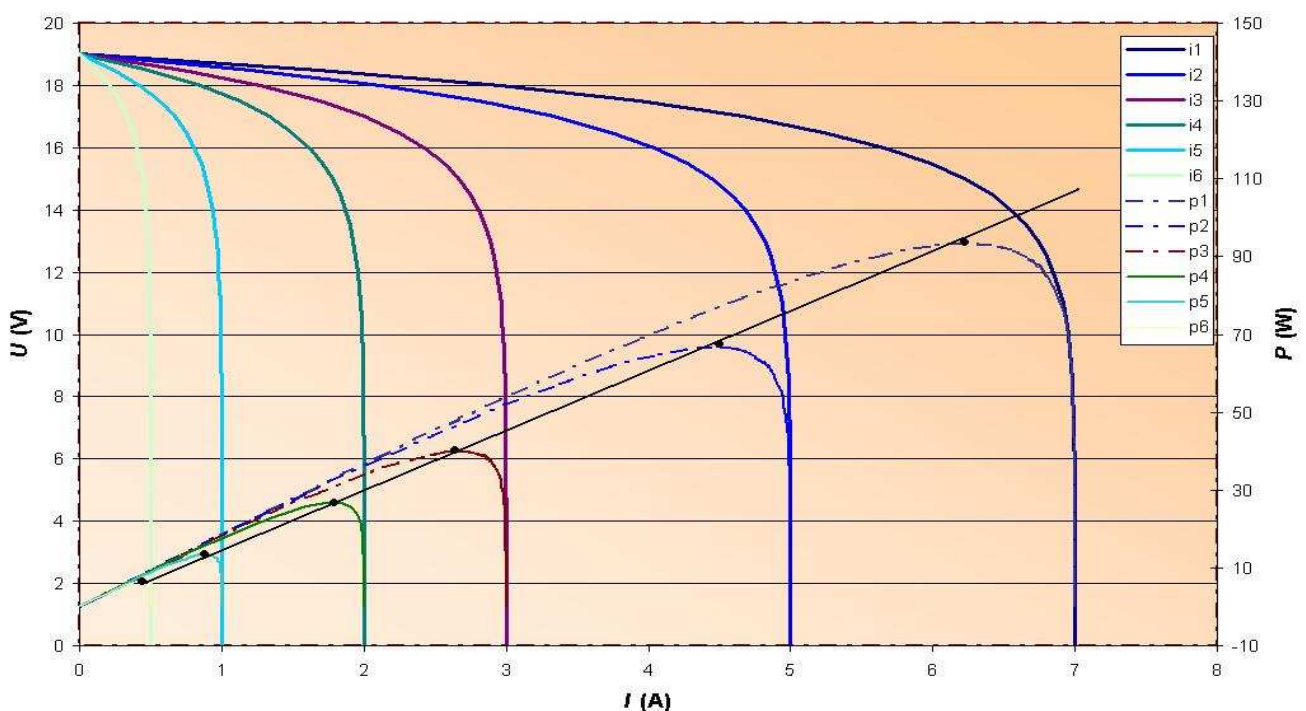


Obr. 15

Závislost  $P=f(U)$  a  $U=f(I)$  fotovoltaického panelu 12V/100W.

Z obrázku 15 je patrný bod maximálního výkonu, který odpovídá pracovnímu napětí PV panelu při hodnotě cca 15V a pracovním proudem cca 6A. Pracovní napětí akumulátoru při nabíjení je ale v rozmezí od 11V (pro vybitý akumulátor) do 14,4 V (pro nabitý akumulátor). To že leží bod maximálního výkonu v blízkosti pracovní oblasti charakteristiky pro nabíjení 12V akumulátoru je záměr výrobců PV panelů, aby byla účinnost PV panelu při nabíjení 12V akumulátorů co největší. Přesto je vhodné, vzhledem k rozptylu bodu maximálního výkonu PV panelu a malých odlišností v charakteristikách PV panelů, využívat pro práci v optimálním výkonovém režimu speciálního nabíjecího regulátoru. (O této problematice bude pojednáno v dalších částech.)

Ve výpočtových algoritmech se využívá především extrémní regulace, kdy je velikost odebraného proudu z PV panelu regulována tak, aby výkon  $P = f(U,I)=U \cdot I$  byl maximální (numerické stanovení bodu maximálního výkonu). Využití analytického stanovení, tj. nalezení místa s nulovou derivací vztahu (2) přichází teoreticky také jako možné. V pravidelných intervalech by byl měřen zkratový proud  $I_{SC}$  a na základě jeho hodnoty by



**Obr. 16**

*V-A charakteristika PV panelu na intenzitě osvětlení a závislost polohy bodu max. výkonu na intenzitě osvětlení.*

byl vypočítán okamžitý pracovní proud. Tato možnost se ale s ohledem na pracnost a výpočtovou náročnost nevyužívá.

Výkon PV panelu je závislý na intenzitě osvětlení. Napětí PV panelu je závislé na intenzitě osvětlení přibližně logaritmicky, při vyšších intenzitách osvětlení dosahuje konstantní hodnoty. Proud PV panelu je na intenzitě osvětlení závislý lineárně. Výkon PV panelu je proto závislý přibližně lineárně na intenzitě osvětlení, viz. kapitola 3.1. Pro technické účely můžeme považovat závislost za lineární. Pro úplné popsání výkonu PV panelu je třeba sestrojít V-A charakteristiku pro soustavu intenzit osvětlení, popř. sestrojít průběh polohy bodu maximálního výkonu v závislosti na intenzitě osvětlení, viz obr. 16. Spojnice bodů maximálního výkonu má u charakteristik podle vztahu (2) tvar přímky, poloha bodu maximálního výkonu je lineárně závislá na maximálním proudu PV panelu, potažmo na intenzitě osvětlení. Stanovení kvantitativní závislosti polohy bodu maximálního výkonu a zkratového proudu při daném osvětlení může být výchozím údajem pro regulátory k rychlému nalezení bodu maximálního výkonu. Požadavkem na PV systém je, aby byl PV kolektor zatěžován právě v oblasti bodu maximálního výkonu, tj. v oblasti kolena V-A charakteristiky panelu. (Pro nabíjení 12V akumulátoru z PV panelu 12V je tento požadavek převážně splněn.) O této problematice bude psáno v dalších kapitolách.

Požadavkem na autonomní PV systém je možnost dodávky elektrické energie dle potřeby napájeného zařízení v kterýkoliv okamžik a dostatečně velkým proudem. Aby byla elektrická energie k dispozici i v období malé či nulové intenzity slunečního záření dopadajícího na PV kolektor, je třeba využít akumulátor elektrické energie (dále akumulátor). Požadavky na akumulátor můžeme shrnout do několika bodů:

- Dostatečná kapacita pro uchování el. náboje v potřebném množství
- Vysoká účinnost akumulace el. energie a minimální samovybití
- Dostatečný počet cyklů nabití-vybití při zachované kapacitě akumulátor a jeho spolehlivosti
- Minimální požadované nároky na údržbu během provozu
- Alespoň krátkodobá odolnost proti nepříznivým a mezním stavům (přebíjení, hluboké vybíjení, vysoká či nízká teplota)
- Příznivá cena

Pracovní režim akumulátorů v ostrovních PV systémech spočívá v určitém odběru el. energie. Obecně předpokládáme náhodný odběr el. energie s náhodnou velikostí (s omezením

maximální hodnoty odebíraného proudu v případě poruchy jištění). Při dimenzování PV systému je stanovena střední denní hodnota odběru el. energie:

$$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \quad (\text{A})$$

často prakticky nahrazována sumou odběru el. energie na základě tabulky denní spotřeby jednotlivých spotřebičů (viz kapitola 3.3), přičemž se předpokládá proudový odběr každého  $i$ -tého spotřebiče za konstantní o hodnotě  $I_i$ :

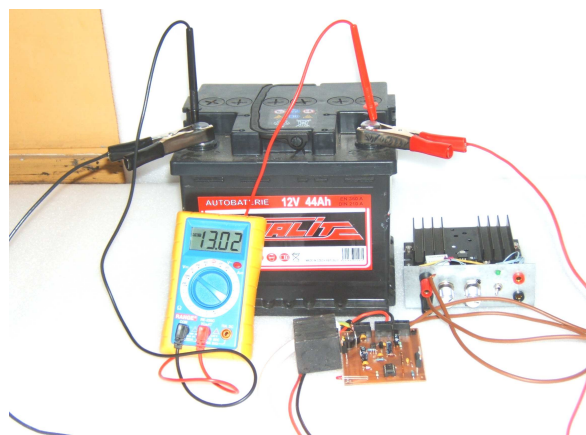
$$\bar{I} = \sum_{i=1}^n I_i \quad (\text{A})$$

Tento údaj je výchozí pro stanovení potřebné kapacity akumulátoru.

$$C_{\min} = \bar{I} \cdot t \quad (\text{A.h})$$

Jsou-li v napájení aplikace přítomny vyšší proudové špičky, je třeba volit akumulátor takový, aby mu vyšší proudový odběr nevadil. Jako použitelné se jeví především akumulátory olověné, dále NiCd, Ni-MH a Li-ion popř. Li-po, jejichž vlastnosti a vhodnost k použití v PV systémech je více popsána např. v práci [4], či v [5].

V současnosti v úvahu připadají především olověné akumulátory, v provedení jako staniční typ. Pro sezónní aplikace lze využít rovněž startovací akumulátory. Ty jsou využívány i v testovacím systému na katedře fyziky (viz. obr.17). Tato volba ovšem není optimální



**Obr. 17**

*Použití olověného startovacího akumulátoru  
12V/55A.h v testovacím PV systému na  
katedře fyziky ČZU v Praze*

odlišný od režimu v PV ostrovních systémech. V budoucnosti lze očekávat převážné užívání akumulátorů Li-ion či Li-polymer. Tento typ akumulátorů se teší velké pozornosti výzkumu pro použití v automobilech jako hlavní či vyrovnávací zdroj elektrické energie pro pohon. Dobré vlastnosti, velká kapacita, vysoká účinnost a bezúdržbovost u akumulátoru Li-ion je vhodným předpokladem

pro PV aplikace. Náročnější podmínky na nabíjení, vybíjení a ochranu proti nežádoucím



stavům, lze v současnosti snadno zjistit vhodnou volbou solárního regulátoru či použitím speciálních dobíjecích regulátorů určených pro Li-ion akumulátory. Značnou nevýhodou je zatím vysoká cena těchto akumulátorů, která jejich hromadné využití vzhledem k vlastnostem a ceně olověných akumulátorů neumožňuje.

S vývojem fotovoltaiky jsou v současné době nabízeny akumulátory určené přímo pro užití v PV systémech (obr.18). Ty splňují výše uvedené požadavky, především dobrou účinnost akumulace el. energie, počet cyklů a bezúdržbovost. Jedná se převážně o staniční olověné akumulátory s kladnými trubkovými elektrodami.



**Obr.18**  
Akumulátor 12V 105 A.h určený speciálně pro použití v PV aplikacích

Mimo dostatečné kapacity akumulátoru pro napájení aplikace po stanovenou dobu, je v autonomních PV systémech důležitá především účinnost akumulátoru:

$$\eta_{Wh} = \frac{Q_{vyb.} \cdot U_{vyb.}}{Q_{nab.} \cdot U_{nab.}} \quad (-)$$

Ta přímo ovlivňuje celkovou účinnost celého ostrovního PV systému, je proto logicky požadována co největší a s malým poklesem s časem a počtem cyklů nabití/vybití. Předpokladem k tomuto požadavku je zajištění správného technického stavu (čistota, hustota a množství elektrolytu) a vhodná okolní teplota.

Kapacita akumulátorů pro PV systémy je maximálně v řádu stovek A.h, pro větší systémy s požadavkem na větší množství akumulované el. energie je nutno řadit akumulátory do sérioparalelních kombinací. O paralelním řazení rozhoduje především požadovaná hodnota výstupního napětí sady akumulátorů, např. pro střídače, elektrický rozvod apod. Paralelním řazením se dosáhne požadované celkové kapacity sady akumulátorů.

Požadavky na místo uložení akumulátorů a zacházení s akumulátory je předmětem technických norem, např. ČSN EN50 272. Důraz je zde kladen především na správné dodržení bezpečnostních předpisů a vzhledem k vývinu výbušných plynů při nabíjení i na větrání prostor (ČSN EN50272-2).

## 4. Solární regulátory

Jak je nastíněno na obr. 13, solární regulátor je „spojovacím článkem“ PV kolektoru(ů), akumulátoru(ů) a spotřebiče(ů). Mimo funkce nabíjení akumulátoru jsou kladeny na solární regulátor i další požadavky, především pak:

- Optimalizace nabíjení akumulátoru s ohledem na čas nabíjení a životnost akumulátoru
- Schopnost udržovacího režimu nabíjení
- Ochrana akumulátoru proti nežádaným stavům (hluboké vybití, přebíjení, zkratový proud, napěťová ochrana apod.)
- Spolehlivý provoz i v náročných venkovních podmínkách po dlouhou dobu bez nutnosti časté údržby
- Minimální vlastní spotřeba, především v klidovém stavu, tj. při malém výkonu z PV kolektoru.

Tyto požadavky lze označit jako základní. Dalšími funkcemi může být inteligentní řízení spotřeby, nabíjení více akumulátorů s různou prioritou popř. řízení jiného způsobu akumulace energie (tepelné, hydropotenciální), spínání bivalentního zdroje elektrické energie a mnoho dalších funkcí.

Použité funkce solárního regulátoru jsou voleny s ohledem na jejich využití v dané aplikaci, na spolehlivost systému a v neposlední řadě i na cenu.

### 4.1 Solární regulátor pracující v režimu nabíjení na konstantní napětí

Režim nabíjení na konstantní napětí, též označovaný jako režim nabíjení „U“ je charakteristický konstantním výstupním napětím regulátoru. Hodnota výstupního napětí regulátoru je rovna svorkovému napětí plně nabitého akumulátoru, popř. jiné hodnoty jako je např. plynovací napětí akumulátoru.

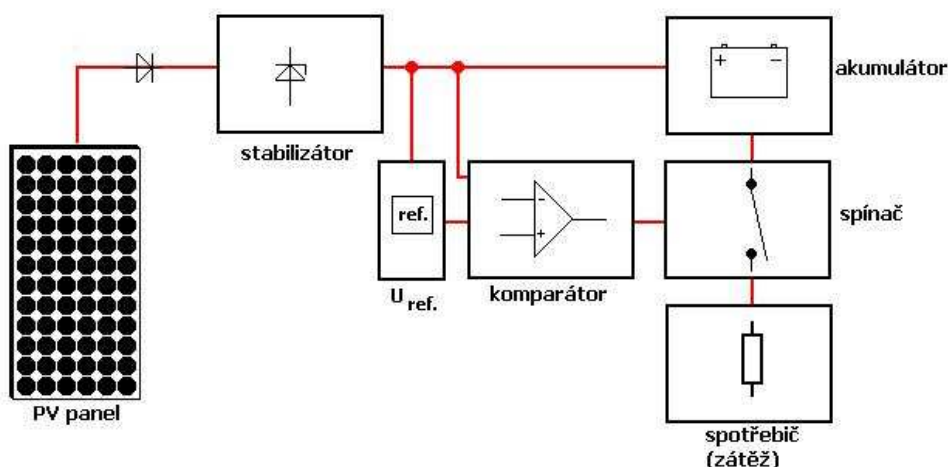
Princip metody vychází z nabíjecí křivky akumulátoru, kdy se jeho napětí s časem nabíjení zvyšuje. Tím dochází ke zmenšování rozdílu potenciálů regulátoru a akumulátoru a v závislosti na vnitřním odporu akumulátoru se zmenšuje nabíjecí proud. Hodnota nabíjecího proudu tak klesá od maximální hodnoty k minimální hodnotě, tzv. udržovacímu proudu. Ten dodává náboj vyrovnávající ztrátu náboje vnitřními svody akumulátoru. Maximální hodnota



nabíjecího proudu je dána jednak zdrojem, tj. jmenovitým výkonem PV kolektoru a intenzitě osvětlení a dále konstrukčním provedením regulátoru. To může zahrnovat vnitřní omezení nabíjecího proudu (viz dále).

Popsaný způsob nabíjení je výhodný pro svou šetrnost. Rovněž je výhodný průběh nabíjení, kdy je vybitému akumulátoru dodán poměrně rychle náboj (uvažováno při dobrých slunečních podmínkách) a v dalších fázích nabíjení je akumulátor dobíjen pomalu snižujícím se nábojem. Vzhledem k charakteristice napětí PV panelu v závislosti na intenzitě osvětlení (obr. 4) je zaručené nabíjení i při nižších intenzitách osvětlení.

Tento způsob nabíjení je vhodný především pro menší aplikace, jak bylo popsáno v kapitole 2.5, popř. pro aplikace s malým či příležitostným odběrem el. energie. Konstrukční řešení solárního regulátoru může mít mnoho variant, základní blokové schéma je znázorněno na obr. 19.



**Obr. 19**

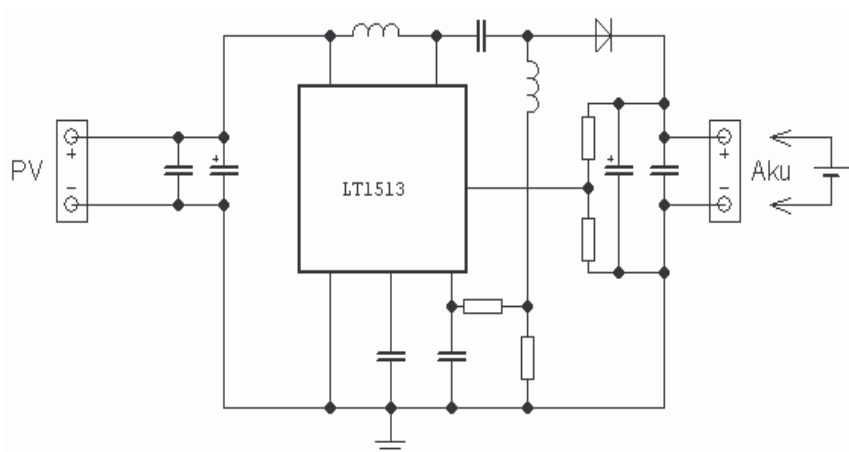
*Blokové schéma solárního regulátoru pracující v režimu nabíjení na konstantní napětí*

Napětí z PV kolektoru je omezeno shora stabilizátorem napětí, čímž je zaručena ochrana proti přebití a rovněž, jak bylo zmíněno, i šetrné dobíjení v koncových fázích. Mezi další nutné ochrany solárního regulátoru je ochrana proti hlubokému vybití. Ta zajistí odpojení zátěže od akumulátoru při nízkém akumulovaném náboji a zamezí tak nevratným změnám akumulátoru. Součástí této ochrany může být u systémů s vysokým stupněm důležitosti varovný signál této události. Další ochrany jsou zpravidla jištění (elektronické či pomocí tavných pojistek), ochrany proti přepětí a případně další dle požadavků aplikace.

Jádrem této metody je stabilizátor napětí. Z povahy vstupního napětí je nutné, aby byl schopen přenést i napětí pod jeho jmenovitým výstupním napětím a při častých přechodech přes tuto hodnotu se nerozkmital a zachoval si tak stabilizační schopnost. Stabilizátor může

být řešen jako lineární (viz. prototyp zkoušený na TF ČZU), popř. jako spínaný. Výhodou spínaných stabilizátorů je schopnost pracovat v napětí zvyšujícím režimu, kdy je obvod schopen dodávat napětí potřebné k nabíjení i při menším napětí z PV kolektoru. Nevýhodou může být náchylnost k nestabilitě vlivem k nelineární V-A charakteristice PV kolektoru.

Na obr. 20 je schéma zapojení spínaného zdroje konstantního napětí, s řídicím integrovaným obvodem LT1513, schopného pracovat s nižším i vyšším vstupním napětím.



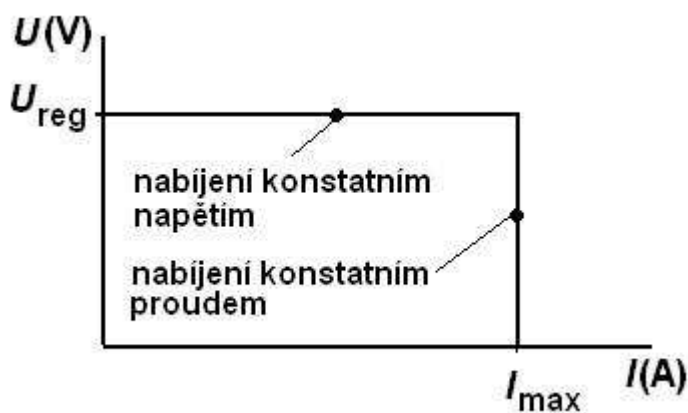
**Obr. 20**

*Spínaný zdroj konstantního napětí*

Pro ochranu proti nežádoucímu rozkmitávání obvodu je důležité zajistit dostatečnou velikost kapacity kondenzátoru na vstupu, aby se eliminovali krátkodobé poklesy vstupního napětí. Ty se vyskytují především při provozu za oblačnosti za snížených světelných podmínek. Popisovaný

spínaný stabilizátor má v sobě integrovanou funkci elektronického omezení proudu. Tato funkce tak jednak slouží jako pojistka proti nežádoucím stavům a je jí možno využít i pro nabíjení podle charakteristiky „UI“, tzv. pravouhlé nabíjecí charakteristiky (obr. 21).

Této charakteristice se využije v případě, kdy je maximální výstupní proud PV kolektoru větší než maximální nabíjecí proud akumulátoru,  $I_{PV} > I_{nab.}$ . Solární regulátor pak při nabíjení při dobrých slunečních podmínkách omezuje nejprve nabíjecí proud akumulátoru na jeho dovolené maximální přípustné hodnotě. V konečných fázích nabíjení, kdy se nabíjecí proud snižuje vlivem zmenšování rozdílu potenciálů regulátor udržuje konstantní výstupní napětí a zaručuje tak ochranu proti přebíjení akumulátoru a kompenzaci jeho samovybíjení.



**Obr.21**

*Pravouhlá V-A výstupní charakteristika regulátoru*

Jak bylo naznačeno výše, je volba maximálního výstupního proudu PV panelu důležitým parametrem pro volbu solárního regulátoru. Ve většině případů bude výstupní proud větší než maximální nabíjecí proud a tak je proudové omezení nabíjecího proudu další z nutných funkcí regulátoru. Pokud by regulátor toto omezení neměl, je nutné volit akumulátor dostatečně velké kapacity, minimálně desetinásobku maximálního proudu PV panelu,  $C \approx 10 \cdot I_{PVmax}$ , není-li výrobcem akumulátoru uvedeno jinak.

Využití pravouhlé nabíjecí charakteristiky je výhodné především pro malé systémy s vysokým stupněm důležitosti, kde je dostatečné množství energie zaručeno několikanásobným předimenzováním výkonu PV panelu.

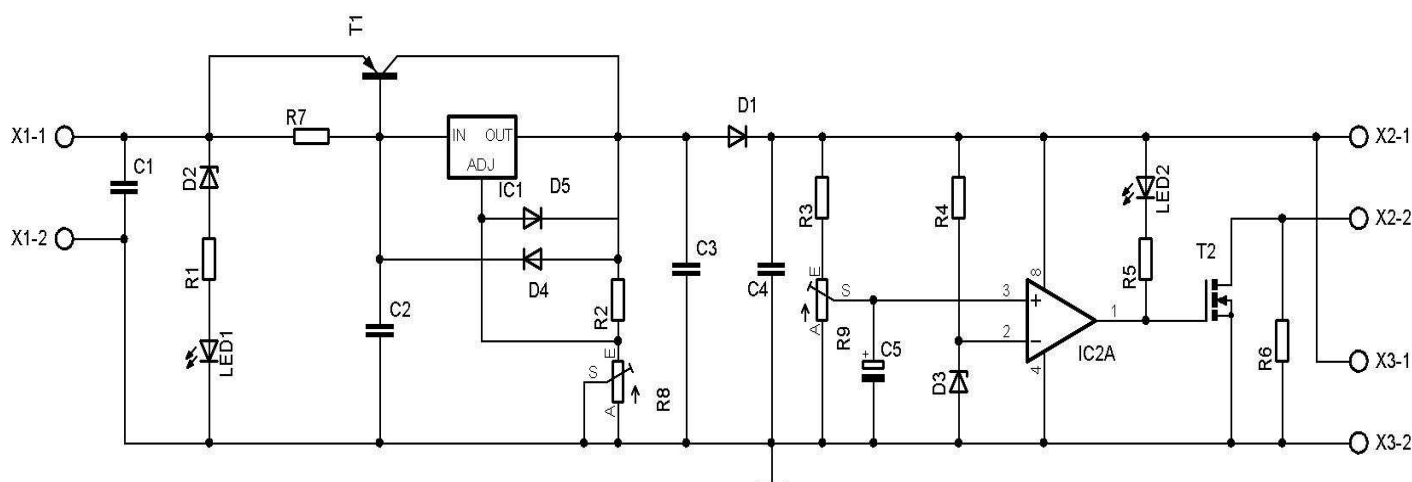
Způsob nabíjení akumulátoru v PV systému podle charakteristiky „U“ je vhodný pro aplikace s příkonem PV zdroje do 100W. Vzhledem k lineární regulaci je na stabilizačním prvku (integrováný stabilizátor, tranzistor) určitá výkonová ztráta  $P_z$ , daná vztahem:

$$P_z = \frac{U_{PV} - U_{reg}}{I_{nab}} \quad (W)$$

kde  $U_{PV}$  je napětí PV kolektoru,  $U_{reg}$  výstupní napětí regulátoru a  $I_{nab}$  je nabíjecí proud. Tuto ztrátu je nutné odvést z výkonových prvků obvodu regulátoru dostatečně dimenzovaných chladičem, což zvyšuje cenu, rozměry a tepelné namáhání součástí regulátoru.

Solární regulátor pracující s charakteristikou „U“ s PV kolektorem 12V/100W byl zkonstruován pro činnost v pokusném ostrovním PV systému v rámci výzkumu na ČZU v Praze. Schéma zapojení solárního regulátoru je na obr. 22. Regulátor je vybaven ochranou proti hlubokému vybití akumulátoru, jištění je v provozu zajištěno tavnými pojistkami. Teoretický rozbor zapojení nabíječky a podrobný popis činnosti v PV systému jsou uvedeny např. v [4],[6]. Konstrukční návod je popsán v [7]. Uspořádání pokusného systému je na obr. 17. V průběhu let 2006-2008 byl fotovoltaický systém se solárním regulátorem nabíjecím akumulátor na konstantní napětí testován, zkoumány přitom byly především následující body:

- Spolehlivost regulátoru z hlediska dlouhodobého bezúdržbového provozu.
- Spolehlivost regulátoru ochránit akumulátor proti nežádoucím stavům .
- Průběhy vybraných veličin během nabíjení.
- Stanovení denního odběru energie, který je PV ostrovní systém každodenně dodat.
- Porovnání metody nabíjení na konstantní napětí s ostatními metodami nabíjení.



**Obr.22**

*Schéma zapojení regulátoru nabíjení na konstantní napětí, použitého v PV ostrovním systému testovaném na katedře fyziky ČZU v Praze*

V zapojení dle obr. 22 je k regulaci výstupního napětí použit integrovaný stabilizátor napětí LM317. Ten je schopen pracovat i při kolísání vstupního napětí pod nastavenou hodnotu výstupního napětí, je důležité blokovat vstup i výstup stabilizátoru keramickými kondenzátory (na obr. XXX jsou to C2 a C3) jako ochrana proti případnému rozkmitání stabilizátoru. Samotný stabilizátor je posílen tranzistorem (T1) pro posílení proudové zatížitelnosti. Výstupní napětí je nastaveno pomocí trimru (R8) na hodnotu 14V. Zátěž je k akumulátoru připojena přes elektronický spínač (T2), a je v případě poklesu napětí na akumulátoru pod nastavenou mez, v našem případě 11V, odpojena. Porovnání napětí akumulátoru je pomocí operačního zesilovače zapojeného jako komparátor. Ten vyhodnocuje napětí z referenčního zdroje (R4 a zenerova dioda D3) a vzorkem napětí z akumulátoru poděleného na trimru (R9). Úbytek napětí je na stabilizátoru LM317 min. 1,5V, což je podstatné pro výpočet ztrátového výkonu na této součástce.

Tento regulátor se během testování osvědčil jak ve spolehlivosti, tak v ohledu na ochranu akumulátoru. Jednoduchá koncepce zapojení (za cenu nutného minima požadovaných funkcí) zaručuje spolehlivý provoz a v případě nutnosti snadnou diagnostiku a případnou opravu.

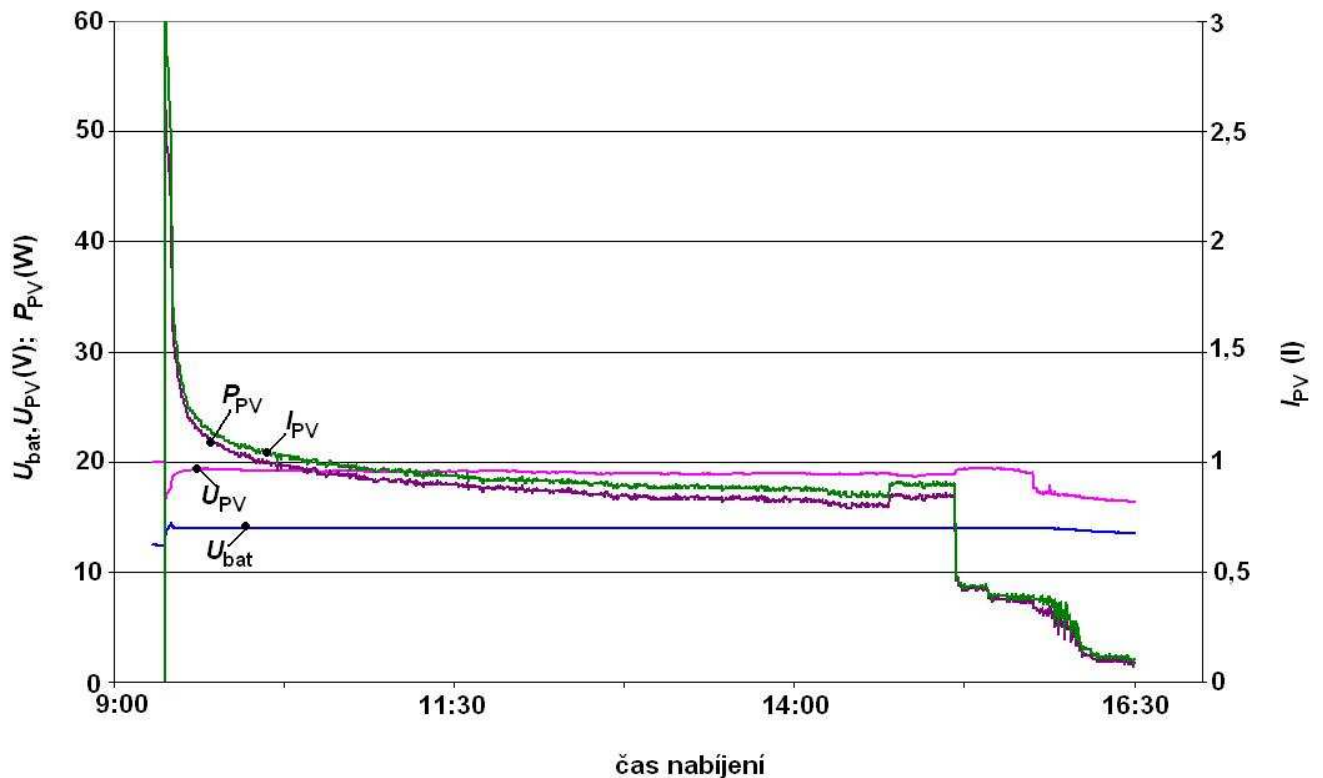
Na obr. 23 je záznam nabíjení akumulátoru solárním regulátorem pracujícím na principu nabíjení na konstantní napětí v pokusném systému (jehož nákres je na obr. 13 v kapitole 3,1). Monitorovány byly v tomto případě parametry: Vstupní napětí z PV kolektoru  $U_{PV}$ , vstupní

proud z PV kolektoru  $I_{PV}$ , svorkové napětí akumulátoru  $U_{bat}$ . Vypočteny dále byly údaje: výkon dodaný PV kolektorem  $P_{PV}$  a množství dodané energie  $E$  (W):

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P dt \approx \sum_{i=1}^n \frac{P_i + P_{i-1}}{2} \cdot \Delta t; \quad n = \frac{T}{\Delta t} \quad (\text{W})$$

vzhledem k náhodnému charakteru křivky výkonu (v závislosti na vnitřním stavu akumulátoru a především intenzity slunečního osvětlení PV kolektoru) se pro stanovení dodané energie nahrazuje integrace numerickým integrováním, tj. sumou střední hodnoty výkonu mezi dvěma naměřenými vzorky. Přepočet na dodaný náboj provedeme snadno podělením dodané energie průměrnou hodnotou napětí akumulátoru:

$$C = \frac{E}{\bar{U}_{Aku}} \quad (\text{A.h})$$



**Obr. 23**

*Záznam vybraných parametrů během počátku nabíjení nabíjecí charakteristikou „U“ v pokusném PV ostrovním systému (měřeno 24.7.07)*

Graf zachycuje měření na konfiguraci pokusného systému:

- PV panel: 12V/100W
- Akumulátor: Startovací 12V/55A.h
- Regulátor: Pracující s charakteristikou nabíjení „U“

Měření bylo uskutečněno během dne s jasným počasím v průběhu dopoledne, od cca 10:30 mírně pod mrakem. Vypočtené energetické parametry jsou následující:

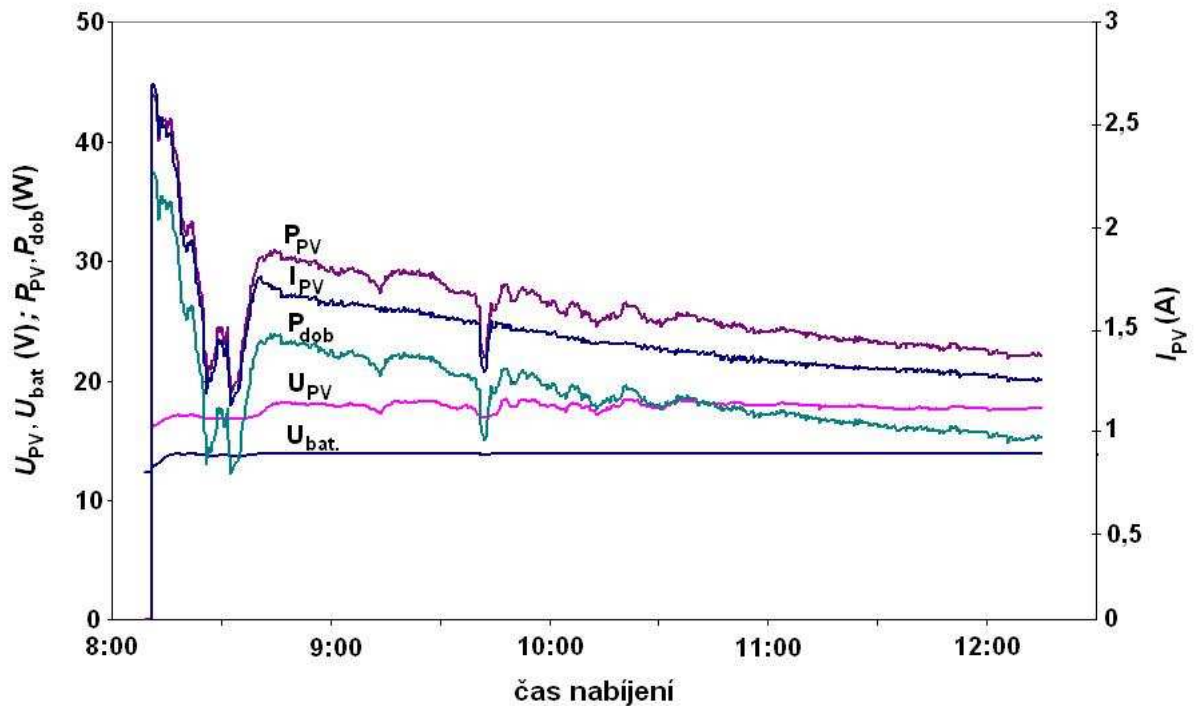
$$E_{\text{nab.}}=70,0 \text{ W.h}; C_{\text{nab.}}=5,0 \text{ A.h}; E_{\text{celk}}=108,6 \text{ W.h.}$$

V průběhu měření byla připojena k akumulátoru zátěž odebírající proud 400mA. PV kolektor tak pokryl spotřebu zátěže (napájeného zařízení) a dále dodal 70,0 W.h k nabíjení akumulátoru. Z obr. 23 je zřejmě patrný velký nabíjecí proud v počáteční fázi nabíjení. V této části je akumulátoru rychle dodán náboj a v případě vybitého akumulátoru je akumulátor poměrně rychle alespoň z části nabit. Pracovní bod nabíjení se pohybuje v tomto případě v okolí místa bodu maximálního výkonu. V dalších částech nabíjení klesá procento využití výkonu PV panelu (pokud zároveň neklesá i intenzita osvětlení). Nabíjecí proud v dalších fázích nabíjení na obr. 23 poměrně rychle klesá. Tento pokles je vlivem snížené intenzity osvětlení, která se po zbytek měřeného období dále výrazně neměnila. Dále je patrné snižování nabíjecího proudu s rostoucím časem nabíjení. Napětí akumulátoru je regulátorem udržováno na maximální hodnotě 14V (pod plynující hranicí). V čase 15:00 byla odpojena zátěž, čímž došlo k poklesu proudu od PV kolektoru a zvýšení napětí PV panelu, napětí akumulátoru je stále udržováno na maximální přípustné hodnotě 14V. V závěru měření je patrný pokles v důsledku snížení intenzity osvětlení zastíněním zapadajícího slunce budovou.

Pokud by výše popsané měření bylo provedeno v praxi, pak by byla spotřeba energie spotřebiče cca 5 W.h. Aby mohla být zátěž napájena energií naakumulovanou v akumulátoru po dalších 18hod., počítáme-li účinnost akumulátoru  $\eta_{\text{AKU}}=0,7$ , pak by musela být energie dodaná PV kolektorem minimálně:

$$E_{\text{min.}} = \frac{5,18}{0,7} = 128,57 \quad (\text{W.h})$$

Při těchto podmínkách by tedy systém nemohl pracovat po delší dobu samostatně, popř. by bylo nutné použít většího výkonu PV kolektoru či spotřebiče s menším odběrem el. energie.



**Obr. 24**

*Záznam vybraných parametrů během počátku nabíjení nabíjecí charakteristikou „U“ v pokusném PV ostrovním systému (měřeno 12.9.07)*

Na obr.24 je záznam jiného dne. Graf zachycuje měření na konfiguraci pokusného systému:

- PV panel: 12V/100W
- Akumulátor: Startovací 12V/45A.h
- Regulátor: Pracující s charakteristikou nabíjení „U“
- 

Měření bylo uskutečněno během dne s převážně difúzním zářením. Vypočtené energetické parametry jsou následující:

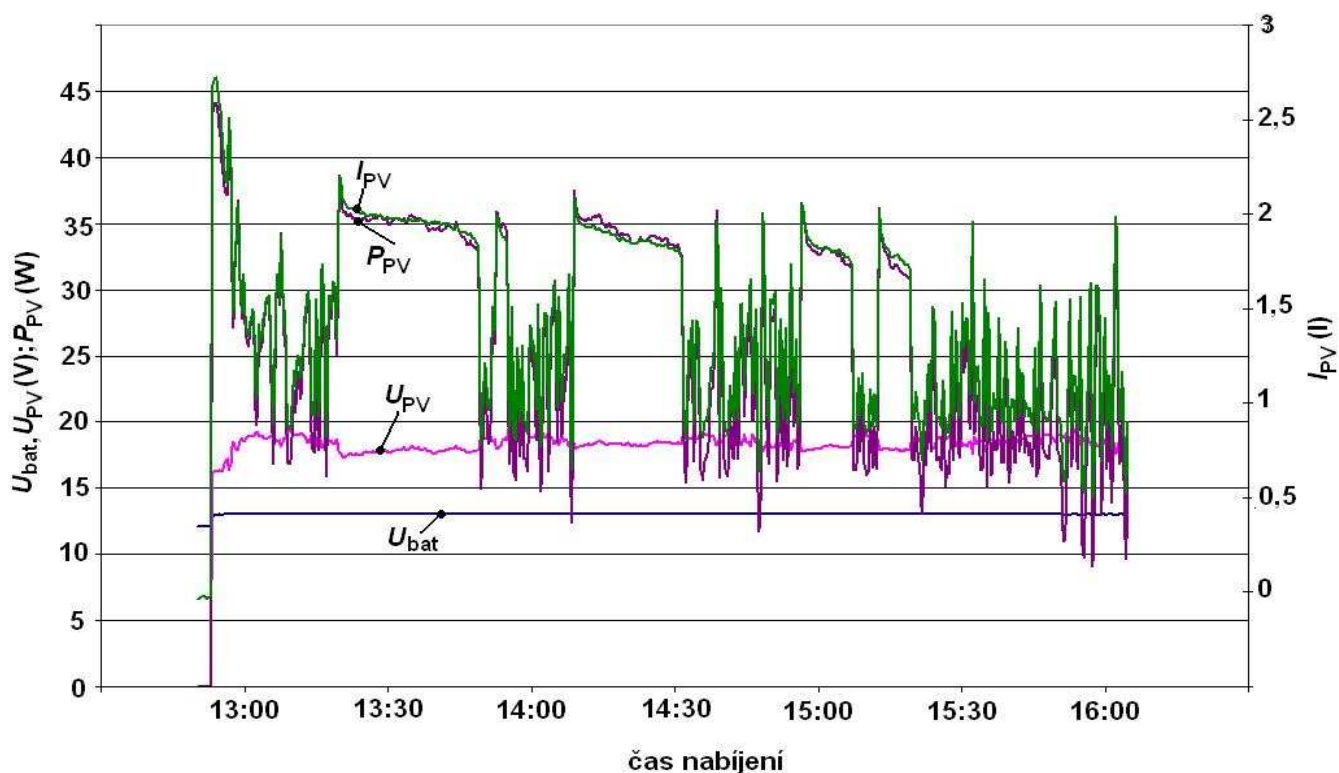
$$E_{\text{nab.}}=74,9 \text{ W.h}; C_{\text{nab.}}=5,4 \text{ A.h}; E_{\text{celk}}=102,3 \text{ W.h.}$$

Opět je z grafu patrné, jako v předešlém případě, prudké nabíjení v počátku a následný pokles nabíjecího proudu se zvyšujícím se nabíjecím časem. Pokles v čase 8:30 je způsoben pravděpodobně mrakem. Průběh napětí akumulátoru je opět udržován na hodnotě 14V, nezávisle na proměnném napětí z PV panelu.



Průběh z obrázku 25 dokumentuje chování PV ostrovního systému během odpoledne s proměnou oblačností. Po časových úsecích s menší intenzitou slunečního záření je rychle dodán ztracený náboj a nabíjecí proud se dále zmenšuje do ustálení na poměrně malé hodnotě.

Proudové špičky v nabíjení souvisí s chováním iontů v elektrolytu. Okrajově je tato problematika popsána v kapitole 4.6.



**Obr. 25**

*Záznam vybraných parametrů PV ostrovního systému během odpoledne s proměnnou oblačností (měřeno 7.6.07)*

Výše popsané příklady dobře dokládají popisovanou situaci, že nabíjení je zpočátku velkým nabíjecím proudem (až daným maximálním výkonem PV panelu, popř. požadovaným proudovým omezením). V dalších fázích se pak nabíjecí proud snižuje. V celém průběhu nabíjení je akumulátor ochráněn proti přebíjení nastaveným maximálním nabíjecím napětím. Teoretický rozbor je, jak již bylo psáno např. v [4]. Snižování nabíjecího proudu je pro akumulátor velmi šetrné, ale prodlužuje to dobu nabíjení a není efektivně využita výkonová kapacita PV kolektoru, nehledě na velké ztráty na lineárním prvku stabilizátoru napětí. Tento způsob se proto hodí do aplikací s velmi malým odběrem proudu, nebo pro aplikace s příležitostným velkým odběrem proudu, kde není na škodu delší doba nabití akumulátoru do plného stavu. Zároveň tato metoda umožňuje nepřetržité nabíjení akumulátoru, kdy je dosaženo tzv. udržovacího nabíjecího proudu, vyrovnávajícím ztráty samovybíjením.

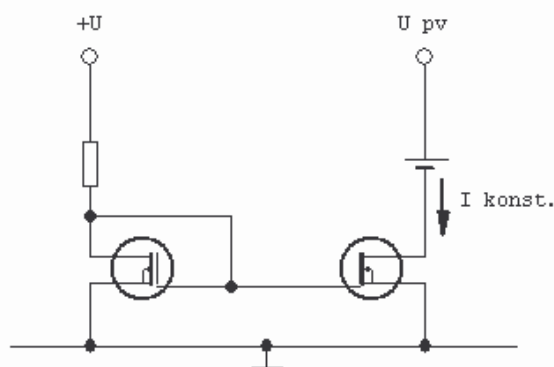


Z průběhů na obr. 23-25 je dobře patrná podobnost průběhu výkonu PV panelu a průběhu proudu. Jak bylo teoreticky naznačeno v kapitole 2.2, je výkon PV kolektoru závislý na proudu PV kolektoru lineárně (lineární závislost max. proudu na intenzitě osvětlení) a tudíž je zde velká míra ovlivnění. Koeficient korelace obou průběhů je pro všechny znázorněné průběhy přibližně  $k_{korel.}=0,99$ . Závislost výkonu PV kolektoru na napětí je přibližně logaritmická. Napětí při malých intenzitách osvětlení prudce roste a se zvyšující intenzitou je téměř konstantní (obr. 4). Proto již tolik neovlivňuje velikost výkonu PV kolektoru. Koeficient korelace napětí PV kolektoru a výkonu PV kolektoru je pro znázorněné průběhy přibližně  $k_{korel.}=0,48$  (průběh obr. 23, 24.) a pro průběh na obr. 25 je dokonce jen  $k_{korel.}=0,26$ . Experimentálně se tak potvrzuje teoretický rozbor.

#### 4.2 Solární regulátor pracující v režimu nabíjení konstantním proudem

Některé nevýhody výše popsaného způsobu nabíjení odstraňuje způsob nabíjení podle charakteristiky „I“, nabíjení konstantním proudem. Název této metody je spíše symbolický, převzatý obecně z elektrotechniky. V případě použití PV panelu jako zdroje elektrické energie nelze v technickém provozu zaručit konstantní hodnoty napětí ani proudu. Jednak vlivem V-A charakteristiky PV panelu, jednak nestálostí meteorologických podmínek a dále skutečností, že Země obíhá okolo Slunce. (Rozložení výkonu dopadajícího na zemský povrch během slunečního dne viz obr. 6.)

Solární regulátor pracující podle nabíjecí charakteristiky „I“ umožňuje především rychlé nabití akumulátoru a větší stupeň využití výkonu PV kolektoru. Jedním z řešení je využití



**Obr. 26**

*Zapojení tzv. proudového zrcadla jako zdroje konstantního proudu*

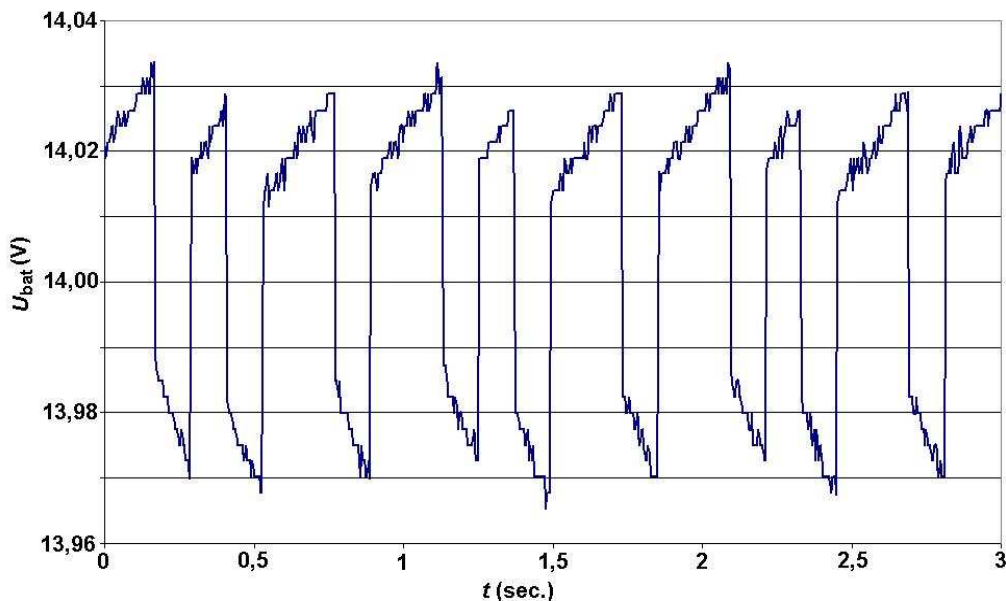
zdroje proudu, např. s využitím lineárního regulačního prvku (viz. obr. 26). Tato řešení jsou vhodná především pro malé aplikace, kde ale není tento způsob nabíjení úplně vhodný, především pro nepříznivý vliv stejné hodnoty nabíjecího proudu ve všech fázích nabíjení na životnost akumulátoru.

Řešením pro větší aplikace (cca 100W výkon PV kolektoru, které jsou zájmem této práce) je v nejjednodušším případě dimenzování PV

panelu a akumulátoru tak, aby maximální proud PV panelu za jasného dne nepřekročil maximální dovolený nabíjecí proud akumulátoru. Pro olověné akumulátory je zpravidla tento proud desetinou kapacity (číselně), tedy platí:

$$I_{PV \max} = I_{C10} \approx_{\text{číselně}} C / 10$$

Vzhledem k velkému výběru akumulátorů na trhu není volba akumulátoru o požadované kapacitě problémem. Úkolem regulátoru pak je zabránit přebíjení akumulátoru včasným odpojením PV kolektoru. Stav nabití akumulátoru je monitorován pomocí svorkového napětí akumulátoru (této problematice je věnována jedna z dalších kapitol). Stoupne-li napětí akumulátoru nad určitou mez, PV kolektor je regulátorem odpojen. Klesne-li toto napětí o určitou diferenci o tuto mez, je opět připojen. Volba napětí je závislá na typu akumulátoru a minimální periodě sepnutí. Za dobu sepnutí se nesmí napětí akumulátoru rovnat či být větší než plynující napětí akumulátoru (viz obr. 27). U prototypu solárního regulátoru testovaného na katedře fyziky ČZU v Praze byla tato hodnota nastavená na 14,0V. Obr. 27 zachycuje změny napětí akumulátoru při připojení a odpojení PV kolektoru. Toto napětí, jak zachycuje graf, je udržováno v okolí zvolené hodnoty 14,0V.



**Obr. 27**

*Výřez průběhu napětí akumulátoru během dvoupolohové regulace nabíjení.*

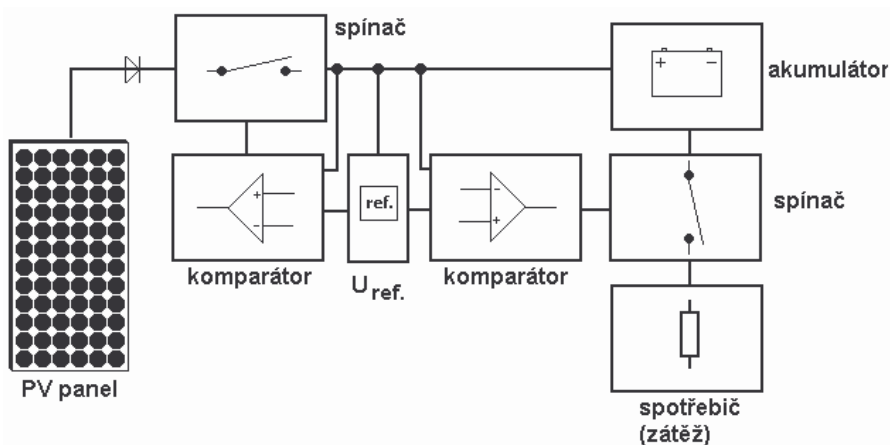
Technické provedení tohoto regulátoru v principu spočívá na měření svorkového napětí akumulátoru a porovnávání s referenční hodnotou. Podle difference pro připojení a odpojení PV kolektoru je pak sepnut či rozepnut spínač. Na obr. 28 je principiální blokové schéma

tohoto regulátoru pracující s touto dvupolohovou regulací. Pro vyhodnocení velikosti napětí lze použít např. operačního zesilovače v zapojení komparátoru, či mikroprocesoru (použit v prototypu). Další funkcí je ochrana akumulátoru proti hlubokému vybití. Ta je řešena na stejném principu. Je sledováno napětí akumulátoru a klesne-li pod nastavenou hodnotu, je odpojena zátěž. Při nárůstu napětí akumulátoru o určitou diferenci od této hodnoty je zátěž opět připojena. Funkce může být řešena opět využitím operačního zesilovače v zapojení jako komparátor, či s použitím mikroprocesoru. U varianty mikroprocesoru je výhoda, že není potřeba referenčních napětí, pouze vzorku napětí akumulátoru. Z toho jsou pak příslušné stavy (připojení či odpojení PV panelu a zátěže) dopočítány dle programu.

Hodnoty pro řízení regulace jsou v případě prototypu nastaveny:

- svorkové napětí akumulátoru pro připojení PV kolektoru: cca 13,8V
- svorkové napětí akumulátoru pro odpojení PV kolektoru: cca 14,02V

Přesné hranice jsou dány rozlišením A/D převodníku mikroprocesoru (je-li použit) a dělicím poměrem obvodu pro snímání vzorku napětí. Obecně lze ale konstatovat, že použití větší



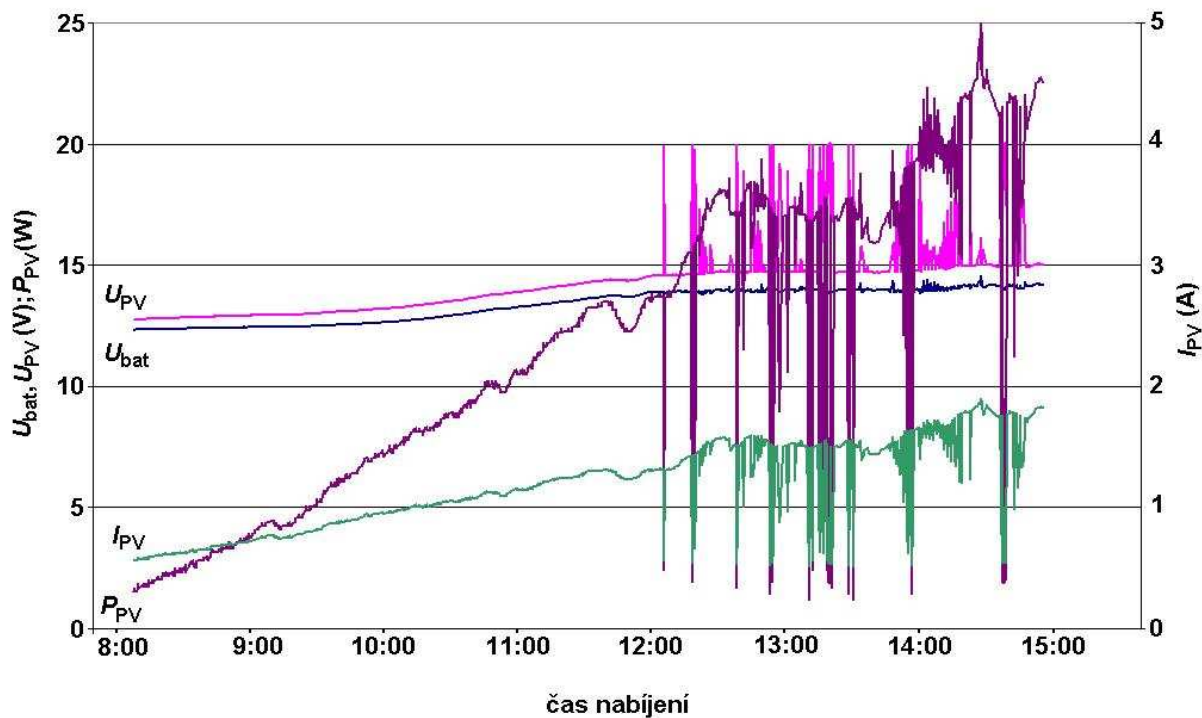
**Obr. 28**

*Blokové schéma solárního regulátoru s dvupolohovou regulací nabíjecího proudu*

spínací difference vede k delším periodám spínání a regulace nabíjecího proudu je tak „hrubá“. Výhodnější je použít menší spínací difference, která zajistí kratší periodou spínání „jemnější“ regulaci nabíjecího proudu a tím i efektivnější nabíjení a větší účinnost systému.

U varianty s operačním zesilovačem se rychlost spínání volí nastavením difference operačního zesilovače.

Na obr. 29 je denní záznam nabíjení akumulátoru v pokusném PV ostrovním systému na katedře fyziky ČZU v Praze. V pokusném systému byl použit solární regulátor pracující s dvupolohovou regulací nabíjení a integrovanou funkcí ochrany akumulátoru proti hlubokému vybití.



**Obr. 29**

*Denní záznam vybraných parametrů při nabíjení akumulátoru s využitím dvoupolohové regulace*

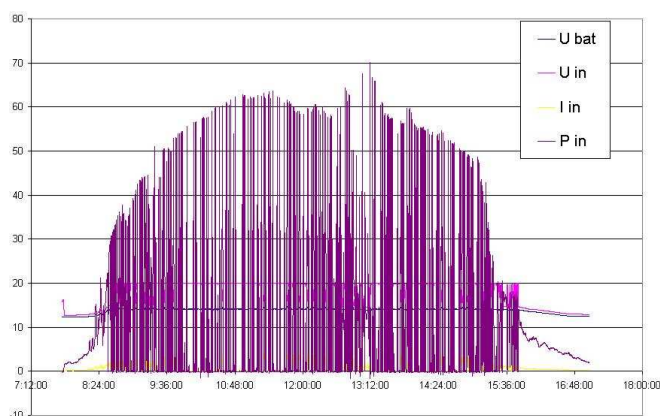
Z grafu je patrný počátek nabíjení, kdy je PV panel připojen k akumulátoru a akumulátor je tak nabíjen maximálním proudem závislým na intenzitě osvětlení a napětí akumulátoru. Napětí PV kolektoru je rovno napětí akumulátoru a napětí ovému úbytku na obvodech regulátoru. V naměřeném záznamu je navíc úbytek napětí na rezistoru pro snímání proudu. Úbytek napětí na obvodech regulátoru by měl v ideálním případě představovat pouze úbytek napětí na spínacím prvku. Jako spínacího prvku se využívá výhradně polovodičových spínačů, a proto by napětí na těchto součástkách mělo být co nejmenší s ohledem na minimalizaci výkonové ztráty.

Z průběhu vybraných veličin nabíjení na obr. 29 je možné rozpoznat okamžik, kdy napětí akumulátoru dosáhlo požadované hodnoty a začne docházet k pravidelnému odpojování a připojování PV kolektoru. Graf v této fázi je díky postupnému snímání hodnot v sepnutém a rozepnutém stavu plný překmitů mezi těmito krajními stavy. Z hlediska delšího časového okamžiku je toto připojování a odpojování regulací střední hodnoty nabíjecího proudu. Střední hodnota proudu vyjadřuje chemické účinky proudu (jde o velikost přeneseného náboje) a tudíž je důležitým parametrem nabíjení akumulátoru. Využití výpočtu střední hodnoty proudu:

$$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt$$

není v tomto případě technicky možné. Časová závislost proudu je vzhledem k okamžiku připojení a odpojení PV kolektoru (daného velikostí odběru, vnitřního stavu akumulátoru, stavu elektrolytu a dalších faktorů) náhodná.

Pro základní analýzu průběhu nabíjení je možné využít grafického znázornění naměřených parametrů. Jak je patrné již z obrázku 29, průběh nabíjení ve fázi trvale připojeného PV kolektoru je snadno dopočitatelný integrovatelný (numericky) a postup zpracování je shodný s postupem u regulátoru dle nabíjecí charakteristiky „U“. V okamžiku regulace, kdy jsou ovšem vybrané parametry měřeny ve svých krajních stavech, je grafické znázornění i výpočet



**Obr. 30**

*Neupravený záznam nabíjení akumulátoru s regulací nabíjecího proudu spínáním.*

dodané energie horší. Ukázka nezpracovaného záznamu z měření je na obr. 30. Pro grafickou analýzu vystačí použití vhodného filtru a znalosti, které krajní stavy jsou relevantní pro vyhodnocení. Pro napětí akumulátoru, výkon a proud PV panelu to jsou horní obálky průběhů (větší hodnoty), pro napětí PV panelu je to spodní obálka (nižší hodnoty). Jsou to stavy v okamžiku připojeného PV panelu a v případě akumulátoru stavy během

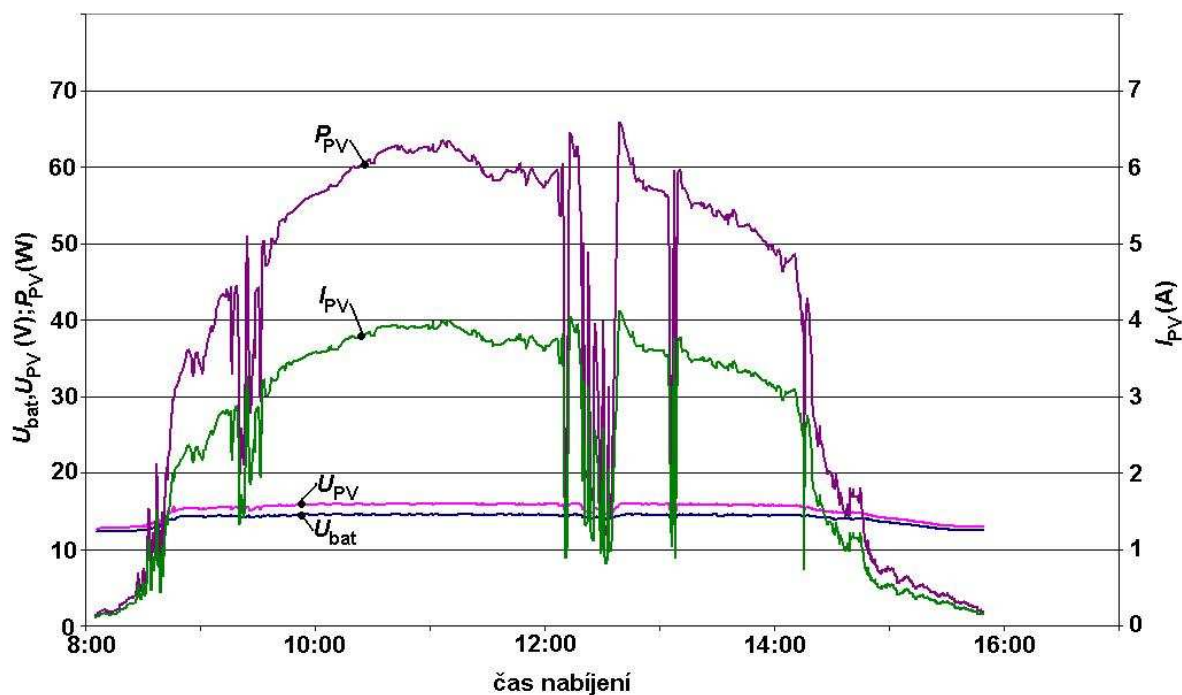
odpojeného PV panelu. Záznam nabíjení po filtraci je na obr. 31.

Obtížnější je situace s numerickou analýzou. Aby byly pomocí měření zachyceny všechny stavy připojeného i odpojeného PV kolektoru, musela by platit známá podmínka vzorkovací frekvence:

$$f_{MINvz} = 2 \cdot f_{reg} = \frac{2}{T_{reg}}$$

kde  $f_{MINvz}$  je minimální vzorkovací frekvence,  $f_{reg}$  a  $T_{reg}$  je frekvence a perioda spínání regulátoru. Maximální perioda je známá z konstrukčního řešení či z programu mikroprocesoru. Měření probíhající v časovém řádu hodin by při periodě spínání cca 1 sec. znamenalo poměrně velké množství hodnot ke zpracování. S využitím softwaru ke zpracování dat (s využitím programu MS Excel s rozsahem zpracování 65 635 hodnot  $\approx 9$  hod měření pro

periodu spínání 1 sec.) je tato možnost ideální a umožňuje korektní matematickou analýzu energetické bilance. Ta je nebytná pro porovnání této bilance s ostatními způsoby nabíjení a činností solárních regulátorů. Pro denní orientační měření je ale obvykle zvolena delší perioda vzorkování. Při zvolené delší periodě vzorkování je nutno využít přibližných metod pro výpočet. Jedno z řešení je provést numerickou integraci průběhu po filtraci, tj. jako by byl PV kolektor připojen trvale k akumulátoru (viz obr. 31).



**Obr. 31**

*Záznam vybraných parametrů nabíjení. Pro grafickou a zjednodušenou numerickou analýzu provedena filtrace platných obálek průběhů. (měřeno 8.10.07)*

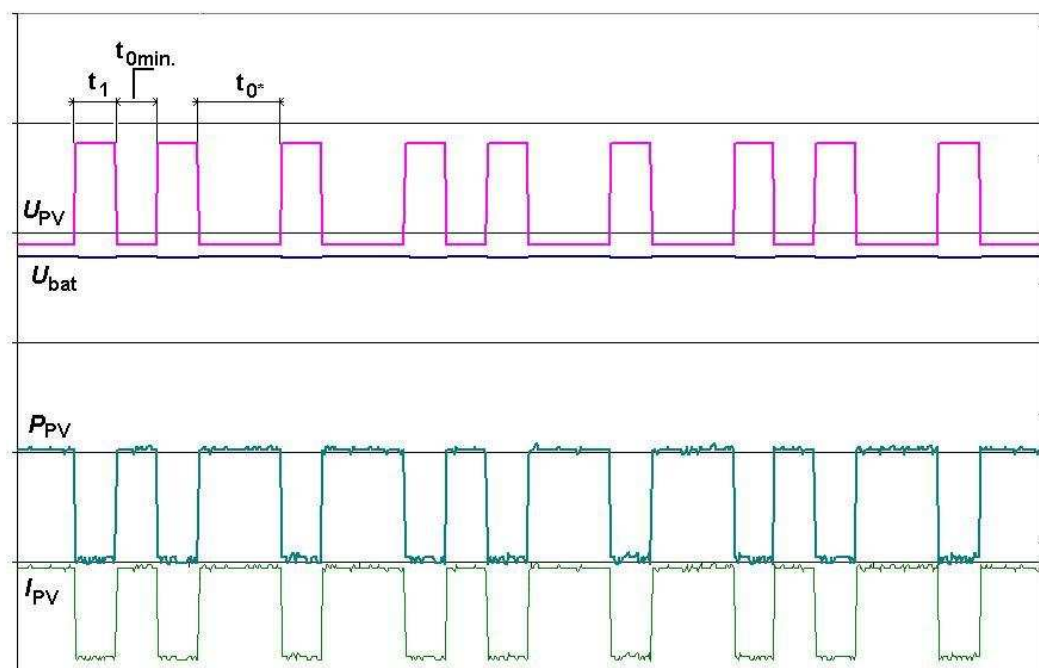
Obr. 32 okazuje časový průběh připojení a odpojení PV kolektoru. Pulzy mají přibližně rovnoměrné rozložení v čase a dá se předpokládat, že v dlouhém sledovaném období (denní měření můžeme za dlouhé sledované období považovat) bude i poměr zachycených a nezachycených sepnutých a rozepnutých stavů shodný se skutečným poměrem. Po filtraci se pak odstraní stavy s odpojeným PV kolektorem, ale úměrně jejich počtu se zkrátí i celkový uvažovaný čas. Ten je v numerické integraci počítán jako časové období mezi vzorky. Numerickou integrací filtrovaného měření tedy dostaneme uspokojivý orientační výsledek pro výpočet dodané energie. Pro měření z obr. 31 je shrnutí měření s využitím přibližné metody stanovení dodané energie:

- PV panel: 12V/100W
- Akumulátor: Startovací 12V/55A.h



- Regulátor: Dvoustavová regulace nabíjecího proudu

Měření bylo uskutečněno během dne s jasným slunečním počasím, ráno mlhavo. Vypočtené energetické parametry jsou následující:



**Obr. 32**  
*Záznam průběhu nabíjení ve větším časovém rozlišení*

$E_{\text{nab.}}=75,6 \text{ W.h}$ ;  $C_{\text{nab.}}=5,09 \text{ A.h}$ ;

Průběh z polojasného dne je na obr. 33. Parametry konfigurace pokusného systému a naměřené hodnoty jsou:

- PV panel: 12V/100W
- Akumulátor: Startovací 12V/55A.h
- Regulátor: Dvoustavová regulace nabíjecího proudu

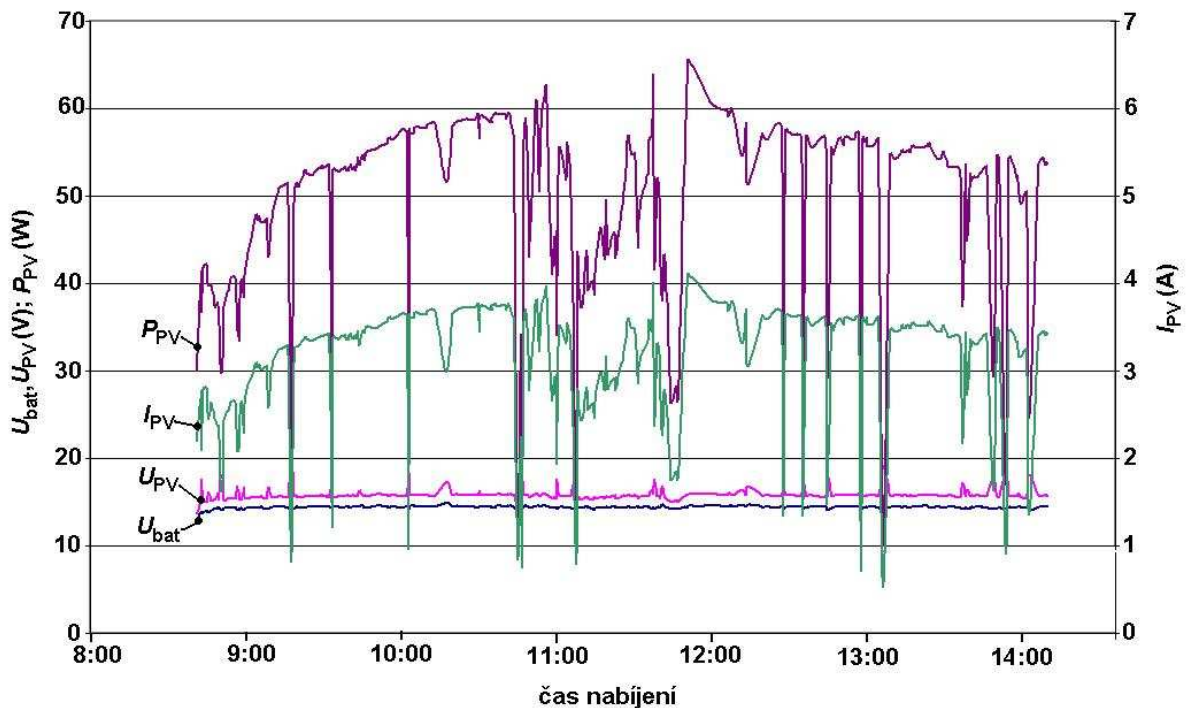
Vypočtené energetické parametry jsou následující:

$E_{\text{nab.}}=58,3 \text{ W.h}$ ;  $C_{\text{nab.}}=4,13 \text{ A.h}$ ;

Tento způsob nabíjení patří mezi velmi jednoduché, a je vhodný především pro regulaci do systémů s nízkým stupněm důležitosti. Podmínkou je rovněž dodržení maximálního proudu PV kolektoru s ohledem na použitý akumulátor. Výhoda je jednoduchost a minimální



výkonová ztráta solárního regulátoru. Ta je dána úbytkem napětí na spínacím prvku a proudem procházejícím tímto prvkem. V sepnutém stavu je úbytek napětí malý (v řádu mV) a ztrátový výkon tak nedosahuje hodnot jako u lineární analogové regulace. V rozepnutém stavu je protékající proud nulový a tak je nulová i výkonová ztráta. Tato výhoda je u všech regulátorů pracujících ve spínaném režimu. Více je k této problematice uvedeno v [8].



**Obr. 33**

*Denní záznam vybraných parametrů nabíjení po filtraci*

Při použití solárního systému k napájení důležitých aplikací je třeba zajistit dostatečné množství energie k napájení i v době bez slunečního svitu (noc, špatná oblačnost). Jednou z možností je využít větší kapacity akumulátoru a v době dobrých slunečních podmínek dodat dostatek energie pro další dny a nebo předdimenzovat PV kolektor tak, aby ve dechy s horšími slunečními podmínkami byl schopen dodat energii pro napájení aplikace a nabít akumulátor alespoň energií potřebnou pro provoz přes noc. Ve dnech s dobrými slunečními podmínkami by pak byla dodána energie pro dny se slunečními podmínkami špatnými. Pro první variantu je dvoustavový regulátor vhodný, pro druhou nikoliv. Není tam totiž schopný omezit maximální nabíjecí proud.

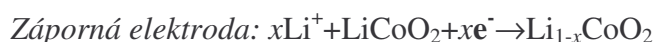
### 4.3 Solární regulátor s řízením nabíjecího proudu pomocí PWM

Požadavek na omezení nabíjecího proudu je ze dvou důvodů. První (výše zmíněný) je omezení nabíjecího proudu z předdimenzovaného PV kolektoru při dobrých slunečních podmínkách. Druhým důvodem je řízení nabíjecího proudu v průběhu nabíjení. S ohledem na životnost akumulátoru a co nejpomalejší pokles jeho kapacity se doporučuje nabíjet v konečných fázích nabíjení menším proudem než jmenovitým, při dosažení plného nabití je pak možno akumulátor nabíjet dále malým proudem, kompenzujícím samovybití. Řízení nabíjecího proudu.

Realizovat řízení nabíjecího proudu je u regulátorů pracujících s výkony nad 10W vhodné pracovat na základě pulzní regulace. Především s ohledem na výkonovou ztrátu na regulačním prvku. Jak již bylo v této práci zmíněno, pro nabíjení akumulátoru, tj. elektrochemickou reakci, je podstatná střední hodnota proudu. Ta vypovídá o el. náboji zúčastňujícího se elektrochemické reakce. Chemická rovnice nabíjení pro olověný akumulátor je:



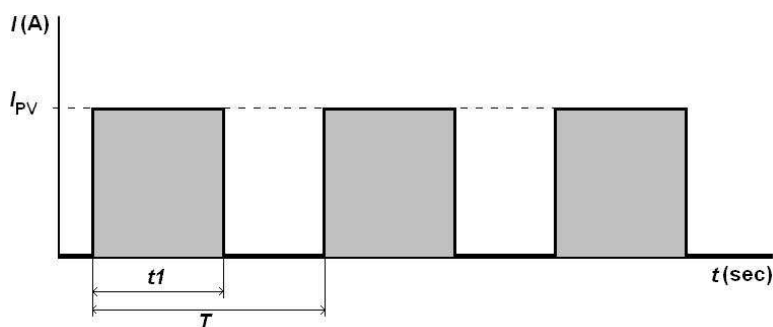
Pro akumulátor Li-ion je reakce:



Elektrochemické děje v akumulátoru probíhají konečnou rychlostí a proto lze uvažovat za střední hodnotu dodaného náboje náboj, dodaný za určitý časový okamžik. Vydeme-li ze vztahu pro střední hodnotu proudu:

$$\bar{I} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{t1} I_{PV} dt + 0 \int_{t1}^T dt \right] = I_{PV} \frac{t1}{T}$$

je patrné, že spínáním proudu z PV kolektoru  $I_{PV}$  v poměru střídý  $t1/T$  (viz. obr. 34) jsme



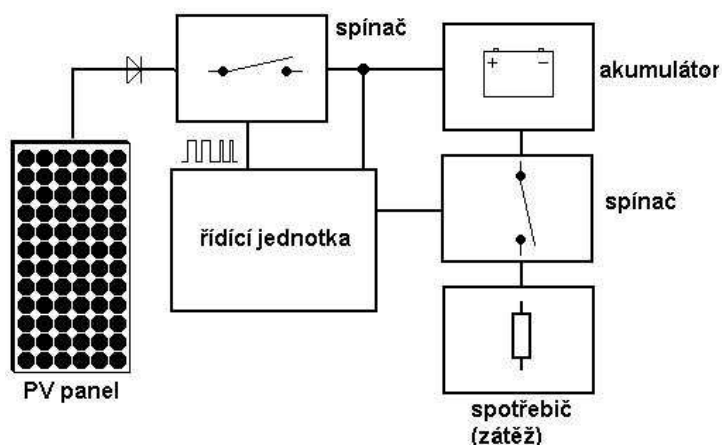
**Obr. 34**

*Poměr střídý určující střední hodnotu proudu*

schopni měnit střední hodnotu proudu. Čím jemněji dovedeme měnit střídý spínání, tím jemněji můžeme regulovat nabíjecí proud od maximálního až po nulový.

Pro praktické použití vystačí

ale poměrně hrubá střída, jelikož k regulaci nabíjecího proudu nedochází plynule ale skokově v několika skocích podle fáze nabíjení. Blokové schéma nabíječky s regulací proudu pomocí pulsně šířkové modulace je na obr. 35. Řídicí jednotka snímá napětí akumulátoru a na základě jeho velikosti, odpovídající stupni nabití akumulátoru, řídí střidu signálu ovládajícího elektronický spínací prvek. Zároveň je na základě hodnoty napětí realizována funkce ochrany akumulátoru proti hlubokému vybití. Tato funkce je shodná s funkcí u regulátoru v předchozí kapitole.



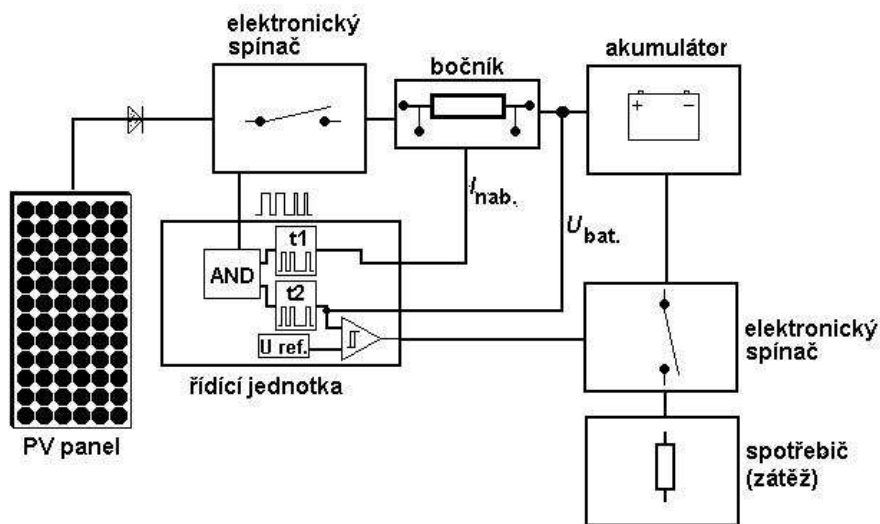
**Obr. 35**

*Blokové schéma solárního regulátoru s PWM.regulací nabíjecího proudu*

tedy počítán z údaje o stupni nabití akumulátoru a celkového nabíjecího proudu. Regulátory pracující na tomto či podobném principu jsou výhradně koncipovány na základě řídicího mikroprocesoru.

Uplatňují se zde plně výhody mikroprocesorového řešení, tj. především variabilita funkcí a řídicích algoritmů dle požadavků aplikace, snadná změna funkcí, možnost zpětného doplnění potřebných funkcí.

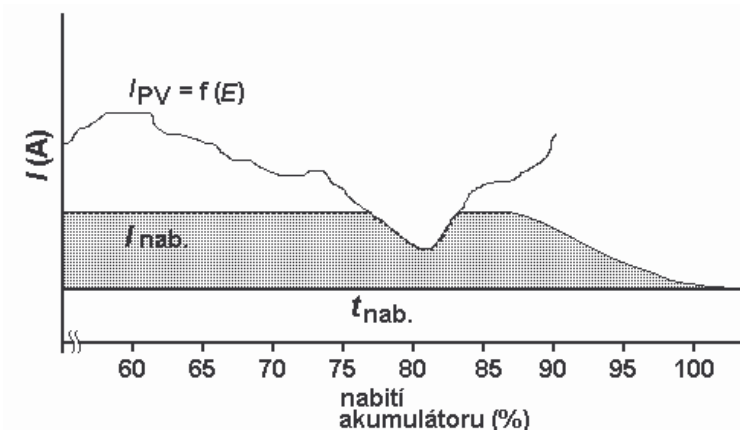
Regulátor s omezením nabíjecího proudu je na obr. 36. Využitím tohoto regulátoru je možno v PV ostrovním systému použít předdimenzovaný PV kolektor. Tím lze poskytovat el. energii dostatečnou pro



**Obr. 36**

*Blokové schéma solárního regulátoru s funkcí omezení nabíjecího proudu*

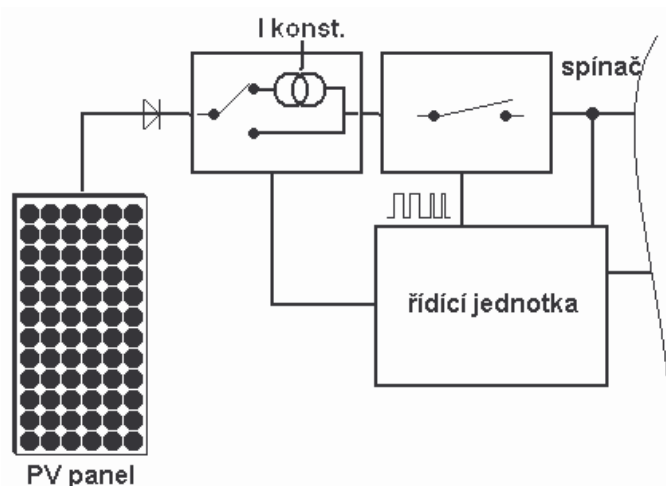
napájení aplikace a dobíjecí akumulátoru i během polojasných dní, popř. dní se vyšší intenzitou osvětlení od difúzního záření. V okamžicích vyšší intenzity osvětlení a tím pádem i většího proudu PV kolektoru je tento proud omezen regulátorem. Situace je naznačena na



**Obr. 37**  
Omezení nabíjecího proudu

Je třeba mít na paměti, že regulována je ve skutečnosti střední hodnota proudu, ale akumulátor je vždy po krátký okamžik vystaven proudu, který je schopen dle daných podmínek PV kolektor poskytnout. A tento proud může vést při značně předimenzovaném PV kolektoru již k poškozování akumulátoru, popř. snižování jeho životnosti. Hranic maximálně přípustného nabíjecího proudu akumulátoru je třeba hledat v technických listech výrobce.

Pro aplikace s vysokým stupněm důležitosti, kde je předimenzování PV kolektoru nutností



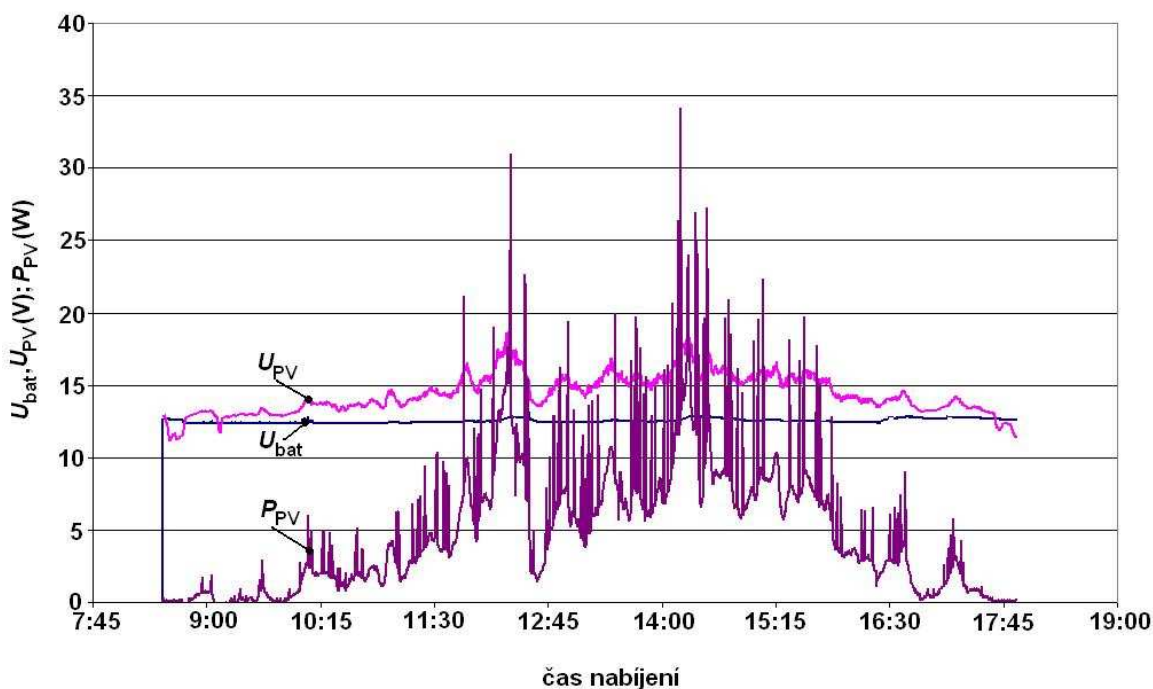
**Obr. 38**  
Omezení nabíjecího proudu lineárním zdrojem proudu

obr. 37. Jak je z obrázku patrné, nabíjecí proud je omezován na maximální přípustnou hodnotu danou typem a kapacitou akumulátoru a v konečných fázích dochází rovněž k omezování nabíjecího proudu s ohledem na požadavky pro šetrné nabíjení a dlouhou životnost akumulátoru. Předimenzování PV kolektoru nemůže být ale libovolně velké.

(např. z požadavku zaručení el. energie i během dne s oblačností) se pak nabízí řešení omezením proudu např. přídavným zdrojem proudu zařazeným v cestě nabíjecího proudu (viz obr. 38). Tento zdroj již musí být lineární, z čehož plyne výkonová ztráta na jeho aktivním prvku (zpravidla tranzistor). Řídící jednotka solárního regulátoru zapíná omezení proudu až na základě vyhodnocení příliš velkého nabíjecího proudu.

Dalším řešením je využít funkce MPP (Maximum Power Point), kde je vstupní napětí upravováno pomocí DC/DC měniče. Předimenzování PV kolektoru u této metody není nutné tak velké, měnič je schopen zvětšit vstupní napětí PV kolektoru tak, aby byl dodáván maximální možný výkon i při horších podmínkách osvětlení. V případě nutnosti (jasné slunečné počasí) je napětí pomocí DC/DC měniče upraveno tak, aby byl zaručen i optimální nabíjecí proud, který může být v případě potřeby zmenšen výše popsanou metodou.

Na katedře fyziky ČZU v Praze byl v testovacím PV ostrovním systému odzkoušen regulátor s PWM regulací nabíjecího proudu. Regulátor byl mimo funkce ochrany proti hlubokému vybití akumulátory vybaven rovněž funkcí řízení spotřeby, o které bude pojednáno v další části této práce. Na obr. 39 je denní záznam nabíjení. Je zde vidět značné kolísání vstupního výkonu PV kolektoru a i vstupního napětí. Napětí akumulátoru je drženo na konstantní hodnotě.



**Obr. 39**  
Záznam vybraných parametrů nabíjení se solárním PWM regulátorem

Graf zachycuje měření na konfiguraci pokusného systému:

- PV panel: 12V/100W
- Akumulátor: Startovací 12V/55A.h
- Regulátor: S PWM regulací nabíjecího proudu

Měření bylo uskutečněno během polojasného dne s převážně difúzním zářením. Vypočtené energetické parametry jsou následující:

$$C_{\text{nab.}}=3,48 \text{ A.h}; E_{\text{celk}}=43,9 \text{ W.h.}$$

Oproti stochastickému řízení spínání dvoustavového regulátoru je u tohoto regulátoru přesně známa střída v závislosti na napětí. Známe-li hodnotu svorkového napětí akumulátoru a proud v sepnutém stavu, můžeme přesně určit střední hodnotu nabíjecího proudu v dané časové oblasti. Výpočet lze proto provádět integrací platných obálek průběhů v celém časovém rozsahu, kde se použije vztah:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P dt \approx \sum_{i=1}^n \frac{P_i + P_{i-1}}{2} \cdot \Delta t \cdot k(u); \quad n = \frac{T}{\Delta t}$$

Kde  $k(u)$  je funkce závislosti střídavy spínání nabíjecího proudu v závislosti na svorkovém napětí akumulátoru. V praxi byl výpočet realizován pomocí programu MS Excel a soustavy filtrů na datech, určujících střední hodnotu nabíjecího proudu pro dané svorkové napětí akumulátoru.

#### 4.4 Další funkce solárních regulátorů

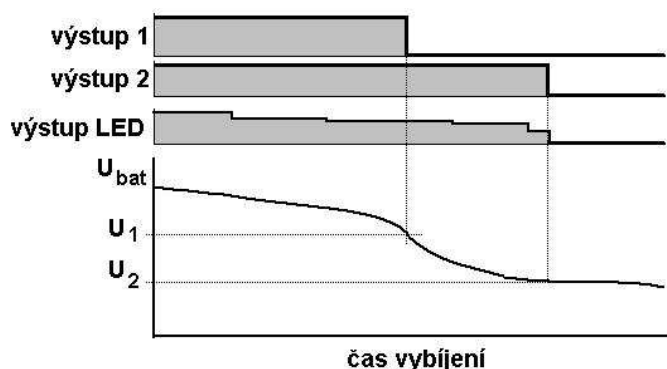
Jak bylo zmíněno výše, na solární regulátor jsou kladeny i jiné nároky než pouze nabíjení akumulátoru bezpečným způsobem. Zmíněné byly již ochrana akumulátoru proti přebíjení a proti hlubokému vybití. Tyto funkce byly naznačeny i v obvodových schématech jednotlivých regulátorů.

Samozřejmostí je jištění proti zkratovému proudu, popř. nadproudu. Především v obvodu akumulátoru. Vzhledem k vysokému zkratovacímu proudu akumulátoru by mohl zkrat zde znamenat nebezpečí požáru. Jištění spotřebičů je možné pomocí elektronické vratné či nevratné pojistky. Pokud nehrozí nebezpečí zkratem v obvodech regulátoru na vstupní části výkonu od PV kolektoru, jištění není nutné. PV kolektor jako zdroj proudu je schopen nepřetržitě zkratu.

Funkce řízení spotřeby je další funkcí, zavedenou v regulátoru v rámci výzkumu na katedře fyziky ČZU v Praze. Tato funkce v závislosti na stupni nabití akumulátoru řídí spotřebu. Regulátor (testovaný) má tři výstupy pro spotřebiče, obecně lze jejich počet mít odlišný, dle potřeby. Při postupném vybíjení, dosažení určité úrovně svorkového napětí, je odpojen první, tzv. sekundární výstup. Z něho jsou napájeny „méně potřebné“ spotřebiče a šetří se tím



energie pro důležité spotřebiče. Ty jsou odpojeny regulátorem až při dosažení hranice úplného vybití akumulátoru a hrozilo by dále nevratné poškození. Při nabíjení akumulátoru jsou výstupy v opačném pořadí s příslušnou hysterezí opět připojeny. Třetí výstup testovaného

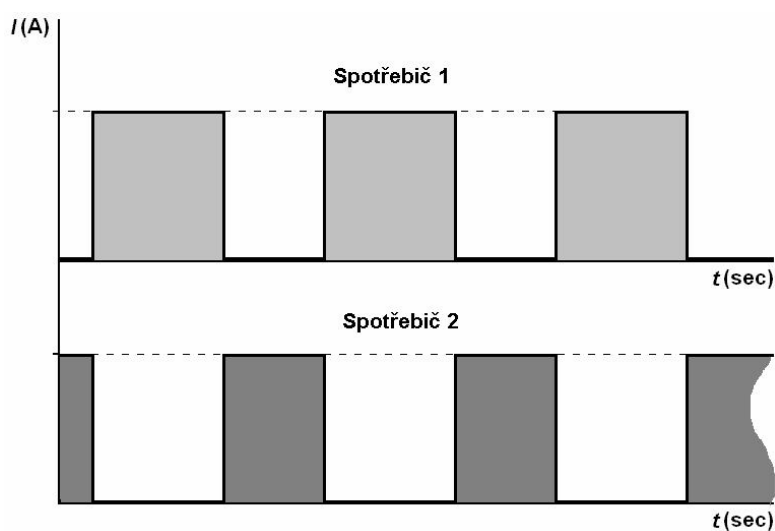


**Obr. 40**  
Časový průběh odpojování spotřebičů

regulátoru je výstup pro osvětlení na bázi LED svítidel. Výstupní napětí je modulováno pomocí PWM tak, že s vybíjejícím se akumulátorem je postupně (či plynule) snižován jas osvětlení a tím dochází opět k snižování spotřeby el. energie z akumulátoru.

Situace je zobrazena na obr. 40, popis řízení LED osvětlení je např. v [9].

Další funkce solárních regulátorů s řízením nabíjecího proudu pomocí PWM je napájení bivalentního spotřebiče. Jak ukazuje časový diagram z obr. 41, lze využít proud PV kolektoru v časové prodlevě a zvýšit tak využití PV kolektoru. Jednou z možností je u aplikací s vysokým stupněm důležitosti nabíjet např. další, záložní akumulátor. Dalším příkladem může být např. akumulace vody do výše položeného zásobníku k pozdějšímu využití apod. Díky snadné modifikaci řídicí části solárního regulátoru lze zajistit připojení druhého spotřebiče na „přebytek“ energie z PV kolektoru až v okamžiku, kdy je zaručeno minimální požadované množství energie pro tento spotřebič.



**Obr. 41**  
Využití energie v PWM řízení nabíjecího proudu pro druhý spotřebič

Solární regulátor může být vybaven obvody monitorující vybrané parametry, jako např. množství energie dodané a vyčerpané z akumulátoru a tak monitorovat stav akumulátoru. Popř. v pravidelných intervalech při přesně definovaném stavu

systemu provést měření hustoty elektrolytu a popř. ovládaným



dávkovačem doplnit demivodu.

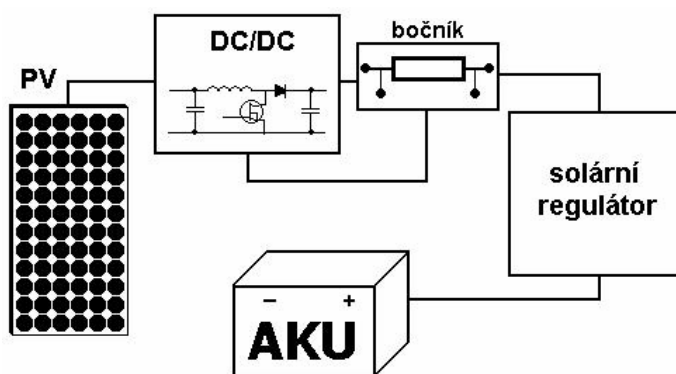
Solární regulátor může být rovněž vybaven patřičnou periferií (RS232, RS 485, USB, Wi-fi, GSM), umožňující komunikovat s dalším, nadřazeným zařízením po některém ze standardních protokolů a tím lze začlenit solární aplikaci jako část např. automatizovaného pracoviště. Lze takto monitorovat stav solárního systému, jako např. stupeň nabití akumulátoru, výkon PV kolektorů (kontrola znečištění) apod.

Zde vyjmenované funkce jsou pouze ukázkou možností. Koncepce by měla vést především k následujícím cílům:

- *Zvyšování účinnosti PV systému*
- *Lepší hospodaření s akumulovanou energií*
- *Zvýšení uživatelského komfortu*
- *Možnost začlenění PV (ostrovního) systému jako modulární jednotky do složitějších celků.*

#### 4.5 Metoda MPPT

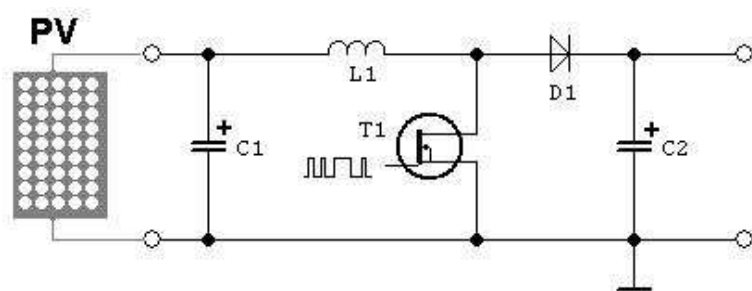
V kapitole XX je naznačen pohyb bodu maximálního výkonu při nabíjení. Většina standardních PV kolektorů pracuje při nabíjení akumulátorů standardního jmenovitého napětí (např. 12V) v blízkosti svého bodu maximálního výkonu. Bylo též několikrát řečeno, že napětí PV kolektoru je závislé na osvětlení přibližně logaritmicky a můžeme ho tedy při nabíjení považovat za přibližně konstantní, na rozdíl od proudu. Z grafů naměřených při nabíjení je patrné, že napětí PV kolektoru není ale přesně konstantní. Je patrná jeho určitá závislost na osvětlení, o čem svědčí např. i stanovený koeficient korelace mezi výkonem PV kolektoru a napětím PV kolektoru (pro připomenutí koeficient korelace napětí a výkonu je cca



**Obr. 42**  
*Blok DC/DC měniče pro funkci MPPT v solárním systému*

$k=0,4$ , proudu a výkonu více jak  $k=0,99$ ). Napětí PV kolektoru je závislé též na teplotě (viz práce [10]). Tato závislost způsobuje největší úbytek napětí a tím pádem výkonu PV systému v případě velké intenzity slunečního záření. Tím je účinnost snižována v maximálních energetických výkonech PV systému

a tedy ztráta je vysoká (pro představu, odhadem se může blížit až 10%). Tyto důvody vedou k využití další funkce solárních regulátorů, často řešených jako samostatný předřadný blok, jak je znázorněno na obr. 42. Tato část systému pracuje na principu zvyšujícího měniče stejnosměrného napětí (uváděného též jako DC/DC měnič). Pomocí akumulčního prvku-cívky je k napětí PV kolektoru přičítáno napětí indukované na cívce v okamžiku rozpojení elektronického spínače. Takto je možno dosáhnout výstupního napětí tohoto bloku vyššího,



**Obr. 43**  
Principiální schéma DC/DC měniče

potřebného pro nabíjení, než jaké v tu dobu poskytuje PV kolektor. Zjednodušené schéma je na obr. 43. Podmínkou je schopnost PV kolektoru dodat dostatečný proud pro vytvoření dostatečného magnetického toku cívkou. Činností tohoto

DC/DC měniče se posouvá pracovní oblast V-A charakteristiky do spodní oblasti. Optimalizační algoritmus udržuje činnost měniče tak, aby se pracovní bod nacházel co nejbližší bodu maximálního výkonu. Jelikož je během činnosti PV systémů tento bod neustále korigován k měnícímu se bodu maximálního výkonu, je tato metoda někdy nazývána též MPPT metoda (Maximum Power Point Method).

Pro zvýšení efektivity PV systému by bylo vhodné použít DC/DC měnič se schopností zvyšujícího i snižujícího měniče. Krom výše popsané výhody zvyšujícího měniče by naopak snižující měnič mohl s vysokou účinností sloužit k snižování maximálního nabíjecího proudu v případě předimenzování PV kolektoru. Za velmi dobrých slunečních podmínek by bylo vstupní napětí z PV kolektoru měničem sníženo tak, platilo:

$$I_{\max} = \frac{U_{DC/DC} - U_{aku}}{R_{aku}} \Rightarrow U_{DC/DC} = I_{\max} \cdot R_{aku} + U_{aku}$$

kde  $U_{DC/DC}$  je výstupní napětí měniče,  $U_{aku}$  je napětí akumulátoru,  $R_{aku}$  je vnitřní odpor akumulátoru a  $I_{\max}$  je maximální proud, který lze regulovat pomocí PWM aniž by byl poškozován akumulátor.

Tato metoda nebyla v testovaném ostrovním PV systému odzkoušena. Je zde uvedena tedy spíš jen pro úplnost práce.

## 4.6 Určování stupně nabití

Až na metodu s nabíjením na konstantní napětí je u ostatních metod třeba monitorovat stav nabití akumulátoru a dle tohoto údaje korigovat nabíjecí proud. Na stavu nabití, resp. vybití akumulátoru jsou závislé i další funkce. Krom řízení jednotlivých nabíjecích fází jsou to např. ochrana proti hlubokému vybití, detekce stavu poruchy (např. zkratování jednoho z článků akumulátoru) a jiné. Obecně lze stav nabití (resp. vybití) akumulátoru stanovit na základě stavu hustoty elektrolytu, svorkového napětí akumulátoru a při nabíjení částečně dle teploty elektrolytu. Sledování teploty elektrolytu může mít v praxi pouze informativní charakter, upozorňující na nežádáný stav při nabíjení, překročí-li teplota určitou mez.

Stav nabití se nejpřesněji určí podle hustoty elektrolytu (u akumulátorů s volným elektrolytem). Ovšem za několika podmínek:

- *Musí být zajištěno přesné množství elektrolytu, na horní hranici objemu elektrolytu*
- *Musí být zajištěno dostatečné promíchání a ustálení elektrolytu a dostatečná časová prodleva mezi ukončením nabíjení a měřením*
- *Měření by mělo být prováděno za teploty elektrolytu 20°C*

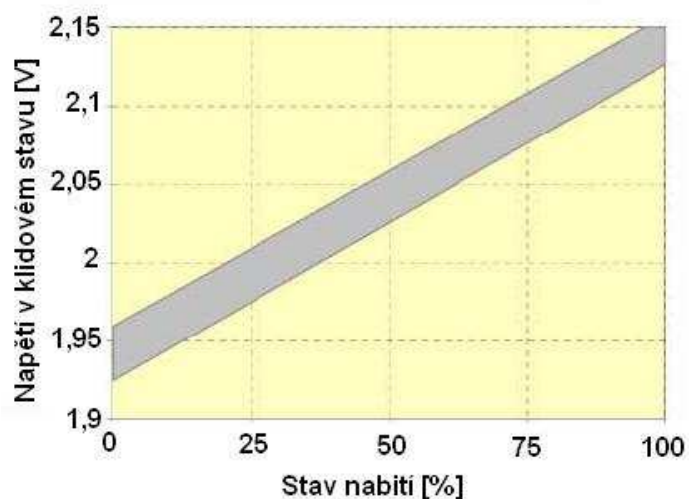
Je zřejmé, že zajištění těchto podmínek v odlehlém provozu není moc reálné. Navíc k automatizovanému měření by bylo třeba sondy v prostoru elektrolytu, popř. vyvedení elektrolytu v uzavřeném cirkulujícím okruhu mimo nádobu akumulátoru. Hlavním problémem je ovšem potřeba častého měření v průběhu nabíjení (v řádu sekund), čímž nelze splnit podmínku ustálení elektrolytu.

Metoda stanovení stavu nabití (vybití) akumulátoru na základě svorkového napětí je pro praxi nejpřijatelnější. Pro akumulátory řízené ventilem je tato metoda jediná. Obecně jsou na tento způsob kladeny podmínky [11]:

- *Měření při referenční teplotě 20°C či 25°C (dle doporučení výrobce)*
- *Měření je prováděno v klidu a min. 24 hod po ukončení nabíjení.*
- *Měření je v případě zaplavených akumulátorů při dobře promíchaném elektrolytu.*

I tyto podmínky nelze v provozu splnit, již jen kvůli zmiňované potřebě měřit napětí akumulátoru v průběhu nabíjení při provozu v praxi v krátkých časových intervalech. Samotné měření napětí je v dnešní době snadné. Hodnoty napětí pro vybrané stavy akumulátoru jsou uváděny výrobci, viz. např. obr. 44. Pomocí analogově-digitálních (A/D) převodníků je napětí převáděno do dvojkového stavu a zpracováno dál procesorem. U

jednodušších koncepcí může být napětí porovnáváno pomocí komparátoru s jedním či více přepínatelných referenčních napětí. Napětí akumulátoru musí být před přivedením na A/D převodník upraveno, převodníky mohou zpravidla pracovat se vstupním napětím 0-5V. Některé způsoby úpravy jsou na obr. 45.

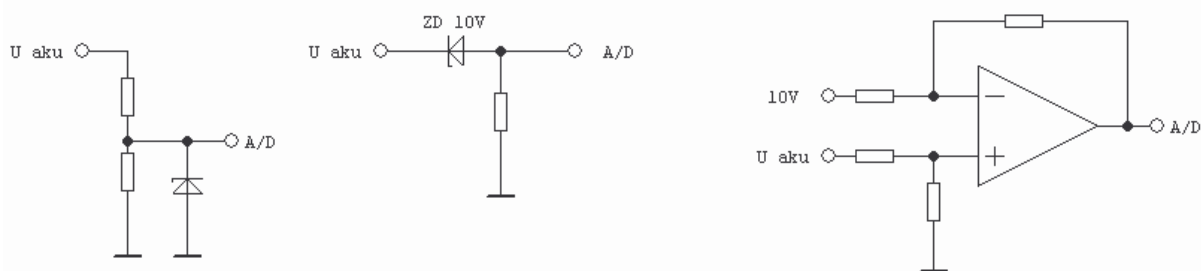


**Obr. 44**

*Grafický průběh závislosti napětí akumulátoru na stupni nabití (při teplotě elektrolytu 20°C).*

Nejjednodušší je použití odporového děliče, s dělicím poměrem se ale zmenšuje i schopnost vyhodnotit změny napětí. Bude-li dělicí poměr 1:3 (při uvažovaném maximálním napětí 15V na akumulátoru bude 5V na vstupu A/D převodníku), budou i změny napětí děleny v poměru 1:3. Protože nás zajímá ale oblast cca 10V až 15 V na svorkách akumulátoru, je vhodnějším řešením místo dělení odečíst od napětí akumulátoru hodnotu 10V, před vstupem na A/D převodník. Řešení

s pomocí zenerovy diody či sumačního zesilovače je znázorněno též na obr. 44.

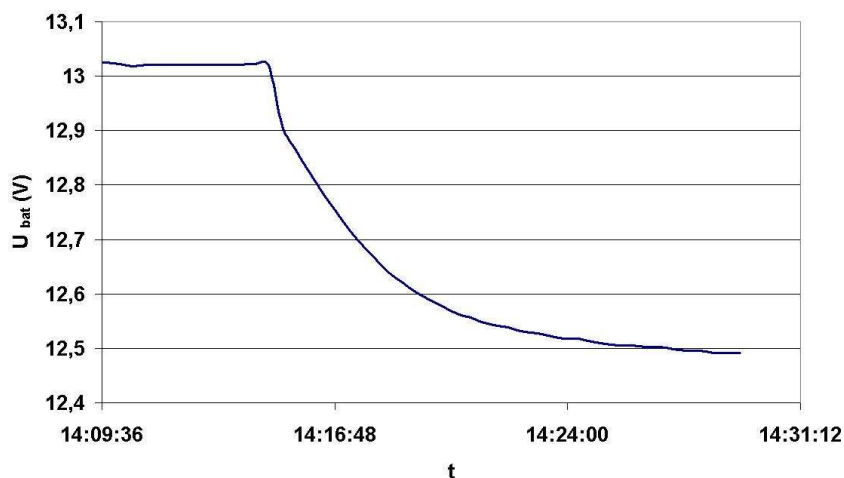


**Obr.44**

*Vybrané možnosti úpravy napětí akumulátoru pro zpracování A/D převodníkem v solárním regulátoru*

Údaj o napětí akumulátoru je dále programově zpracováván. Pomocí vhodného algoritmu je možné upravit i nepřesnosti této metody vyhodnocení stavu nabití akumulátoru. Nepřesnost spočívá především ve faktu, že napětí akumulátoru není tvrdé, ale je ovlivněno ději v elektrolytu. Z obr. 27 je vidět změna svorkového napětí akumulátoru v průběhu připojení PV kolektoru po dobu cca 0,8sec. O charakteru nepřesnosti vypovídá více záznam napětí

akumulátoru při odpojení zdroje nabíjecího proudu, uvedeným na obr. 46. Exponenciální průběh poklesu napětí je v souladu s průběhem vybíjení RC členu.



**Obr. 46**

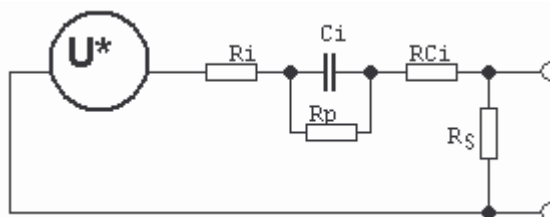
*Pokles napětí akumulátoru po ukončení nabíjení*

Můžeme si tedy akumulátor představit náhradním zapojení dle obr. 47. K samotnému tvrdému zdroji napětí s velmi malým vnitřním odporem  $R_i$  (představující akumulátor) je sériově přiřazen kondenzátor  $C_i$  s vnitřním odporem  $RC_i$ . Ten se při nabíjení nabije na určité napětí  $U_{C_i}$  a zvyšuje tak o toto napětí elektrochemické

napětí akumulátoru. O nabíjení této „kapacity“ svědčí i proudové špičky během nabíjení při zvýšení intenzity osvětlení, viz. obr.

25. Časová konstanta RC členu je delší než perioda spínání (v řádu minut). Zvýšené svorkové napětí akumulátoru je pak měřeno solárním regulátorem.

Fyzikální podstata zvýšeného napětí spočívá ve zpětné difúzi iontů elektrolytu, kdy po skončení nabíjení



**Obr. 47**

*Upravené náhradní schéma akumulátoru o vnitřní kapacitu*

(v případě spínaného průběhu nabíjecího proudu během prodlev) je rozdílná hustota elektrolytu v aktivních hmotách elektrod a okolního elektrolytu. Vyrovnávání hustot pak vede k přibližně exponenciálnímu poklesu zvýšeného napětí. Tento jev je výhodný pro činnost solárních regulátorů řídících nabíjecí proud spínáním. V době odpojení PV kolektoru umožňuje pokračovat v ději nabíjení a tak zlepšovat průběh chemické reakce.

Pro funkci ochrany akumulátoru proti hlubokému vybití tento jev nemá význam, napětí akumulátoru při vybíjení odpovídá jeho skutečnému elektrochemickému napětí (po vybití sériové kapacity  $C_i$  je nutno uvažovat překlenutí nulovým odporem  $R_p$ ). Naopak při určování stavu akumulátoru při nabití je nutno s tímto jevem počítat. Od naměřeného svorkového napětí je potřeba odečíst napětí na sériové kapacitě (názvy jsou uvažovány vzhledem

k náhradnímu schématu). To lze snadno provést softwarově pomocí mikroprocesoru, obtížnější je určení správné kapacity. Tento problém byl v rámci výzkumu ostrovního PV systému řešen jen okrajově, a to zvýšením hranice 14,4V plynujícího napětí na 14,5V.

V případě potřeby by bylo nutné stanovit napětí na kapacitě  $C_i$  v závislosti na střídě spínání nabíjecího proudu a tímto údajem korigovat naměřené napětí akumulátoru.

## 5. Spotřebiče v ostrovním PV systému

V podstatě lze říci, že spotřebič je takovou součástí ostrovního PV systému, kvůli které je celý systém navrhován a projektován. Spotřebiče, konkrétně jejich příkon, stupeň důležitosti provozu a doba provozu jsou výchozím podkladem pro dimenzování .

Má-li být provoz ostrovní PV aplikace efektivní, je třeba již volbě spotřebičů a druhu jejich provozu věnovat velkou pozornost. Vždy je třeba zajistit následující požadavky:

- Volba spotřebiče s nejnižší možnou spotřebou v rámci ekonomické efektivity výstavby a provozu ostrovního systému
- Zajištění doby provozu spotřebičů jen po dobu nutnou
- Inteligentní řízení spotřeby spotřebičů
- Inteligentní řízení napájení spotřebičů v závislosti na důležitosti a dalších parametrech (např. množství energie z PV kolektoru)

Tyto požadavky mohou být řešeny přímo solárním regulátorem, jako u solárního regulátoru testovaném v pokusném systému na katedře fyziky ČZU (např. inteligentní řízení jasu osvětlení či vypnutí sekundárních spotřebičů). Jiné funkce mohou být přímo obsaženy v přístrojích (automatické uvádění do režimu se sníženou spotřebou) či přídatnými moduly, jako jsou časovací zařízení (např. měření výšky hladiny a odeslání dat GSM sítí vždy po hodině, po zbytek času jsou zařízení v klidu).

Průmyslová automatizace, popř. zákaznické řešení umožňují tyto požadavky tzv. Power managementu splnit.

## **6. Vyhodnocení a diskuze k výsledkům pokusného ostrovního PV systému**

### **6.1 Práce na ostrovním PV systému**

Na pokusném ostrovním PV systému na katedře fyziky ČZU v Praze byly testovány především solární regulátory, pracující s pevným PV kolektorem 12V/100W a startovacími olovenými akumulátory 12V/45A.h a 12V /55A.h. Pro jednotlivé (výše popsané) regulátory byly prováděny testy na spolehlivost v provozu a na energetické bilance systému. Především na maximální denní odběr (střední hodnota) pro nepřetržité napájení aplikace, a na energetické bilance nabíjení v jednotlivých dnech. Dále byli řešeny problémy s návrhem optimálního solárního regulátoru, problémy s určením stavu akumulátoru na základě svorkového napětí a jiné problémy méně související s činností ostrovního PV systému. Některé z dílčích výsledků byly publikovány průběžně v periodikách či na vědeckých konferencích.

Co se týče otázky spolehlivosti provozu, všechny tři regulátory pracovaly po delší dobu (týdny) bez problémů a plnili dobře požadované funkce.

Při vyhodnocení energetických bilancí je nutno přihlídnout ke krátkému časovému období, kdy byla měření prováděna. Pro platné výsledky by bylo třeba nepřetržitého pozorování systému s vybraným typem solárního regulátoru po dobu několika let. Pak by bylo možno vynést závěry o činnosti ostrovního PV systému v daných podmínkách. Měření prováděná na pokusném systému a v rámci této práce byla především na testování činnosti solárních regulátorů a jejich porovnání.

### **6.2 Energetické bilance solárních regulátorů v ostrovním PV systému**

PV systém byl provozován jako systém s trvalým odběrem el. energie definované hodnoty. Na základě denního množství odebrané energie (v jednotkách W.h, popř. A.h uvažujeme-li jmenovité napětí, v našem případě 12V) je možno stanovit střední hodnotu odebírané energie.

V této práci byly uvedeny příklady nabíjení v polojasných až jasných dnech. Z výběru většího množství vzorků a na nich provedených energetických bilancí byly predikovány dále uvedené závěry.

Příklad úvahy pro energetickou bilanci jsou následující:



Z grafu průběhu nabíjení jsme schopni zjistit množství energie dodané systémem  $E_{PV}$ . Na základě tohoto údaje a známé účinnosti akumulace (zjištěné experimentálně či z technických listů výrobku) jsme schopni stanovit množství náboje dodané k dalšímu užití:

$$C = \eta_{aku} \frac{E_{PV}}{\bar{U}_{aku}} \quad (\text{A.h})$$

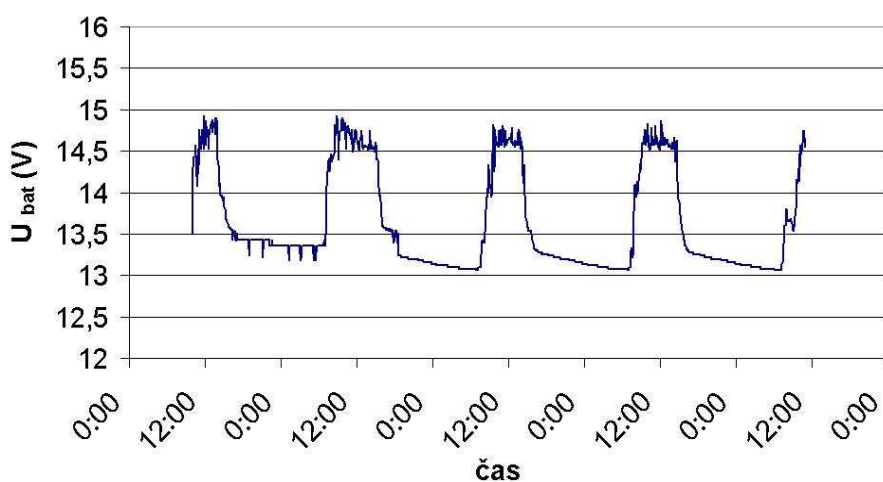
Při stanovené střední hodnotě odebíraného proudu za den  $I_d$  (viz kapitola 2.4), známe náboj potřebný pro napájení aplikace:

$$C_d = I_d \cdot t = I_d \cdot 24 \quad (\text{A.h})$$

přičemž tyto náboje jsou si rovny v případě, má-li PV kolektor zajistit napájení aplikace po 24h. Tedy pro odběr aplikace při jmenovitém napájecím napětí dostáváme:

$$I_d \leq \frac{\eta_{aku} \cdot E_{PV}}{\bar{U}_{aku} \cdot t} = \frac{\eta_{aku}}{24} \cdot \frac{E_{PV}}{\bar{U}_{aku}} \quad (\text{A})$$

Výpočet se snadno převede na formu pro stanovení energie, resp. příkonu pro napájenou aplikaci. Jelikož je ve výpočtu použita hodnota průměrného napětí akumulátoru po čas nabíjení, je třeba v nutnosti přesných výpočtů počítat s ní. Pro orientační výpočet můžeme použít jmenovité napětí olověného akumulátoru 12V. Vyšší přesnosti by šlo docílit ještě použitím průměrné hodnoty napětí akumulátoru z několikadenního měření, které objektivně vystihuje situaci (viz obr. 48).



**Obr. 48**

*Vícedenní záznam napětí akumulátoru v ostrovním PV systému s trvalým odběrem*

Na základě výše popsaného jednoduchého výpočtu byl z měření probíhající ve vybraných dnech stanoven příkon: 300mA.

Tento údaj má ale pouze orientační význam. Mohl by sloužit jako údaj pro rychlé a orientační stanovení energie, kterou je PV systém

schopen poskytnout. Ovšem za předpokladu napájení aplikace s nízkým stupněm důležitosti. Pro dimenzování PV systémů je třeba volit údaje pro jednotlivé meteorologické situace, roční období, typ solárního regulátoru a účinnost akumulátoru. Dle požadovaného stupně důležitosti

napájení aplikace a uvažované době provozu (sezónní, celoroční) pak volit za směrodatný nejnižší hodnotu příkonu v dané situaci. Tato problematika úzce souvisí s problematikou předimenzování systému, jíž bude věnována další kapitola.

Pro vybrané dny, a typ solárního regulátoru je v následující tabulce (tab.6.1) vybráno několik hodnot. Ty byly stanoveny na základě několika uskutečněných měření pro dané meteorologické situace. Vzhledem k malému počtu měření jsou tyto hodnoty spíše orientační. Rozsáhlejší soubor dat pro uspokojivé statistické zhodnocení bohužel chybí<sup>2</sup>. Rovněž je třeba připomenout, že jednotlivá nabíjení neprobíhala za zcela shodných počátečních podmínek, tj. akumulátor se nacházel často v různém stupni nabití. Stav elektrolytu akumulátorů byl monitorován průběžně, lze jej proto považovat za stejný během všech měření.

**Tab. 6.1.** Vybrané hodnoty příkonů pro napájení aplikace (jmenovité napětí systému 12V)

	Analogový regulátor	Dvoustavový proudový regulátor	Regulátor s PWM regulací
jasno	12 A.h	15 A.h	18 A.h
polojasno*	8 A.h	5 A.h	7 A.h
zataženo**	3 A.h	3 A.h	2 A.h

Pro podrobné hodnocení energetických bilancí by bylo třeba postupovat následovně:

- 1) Připravit akumulátor na definovaný stav nabití, např. dle svorkového napětí
- 2) Za definovaných podmínek (roční období, meteorologická situace, teplota, průběh osvětlení) nabíjet po dobu světelného dne akumulátor
- 3) Vybíjet definovaným způsobem akumulátor zpět na počáteční stav nabití, náboj zaznamenat.

Toto měření je třeba provádět pro jednotlivé meteorologické situace a jednotlivé roční období. Na základě těchto údajů stanovit energetické bilance ostrovního PV systému.

Během testování pokusného systému byla nastavena hodnota trvalého odběru 200mA. PV ostrovní systém s tímto odběrem pracoval nepřetržitě, aniž by byla zátěž odpojena ochranou proti hlubokému vybití. Lze tuto hodnotu proto považovat za dlouhodobě experimentálně odzkoušenou a uvažovat o ní jako o směrodatné pro navrhování PV systémů.

<sup>2</sup> Převážná část práce na katedře fyziky ČZU v rámci řešení diplomové práce byla věnována konstrukci a testování solárních regulátorů a jejich funkcí. S ohledem na čas a omezené dostupné měřicí přístroje nebyl proveden monitoring činnosti systému v delším čase.

### 6.3 Předimenzování ostrovního PV systému

V souladu s kapitolou 6.2, má-li PV systém být schopen pracovat i při nižších intenzitách osvětlení tak, aby mohl napájet aplikaci pro její celodenní činnost, musí takovýto systém být předimenzovaný<sup>3</sup>. Obecně lze uvažovat dvě cesty předimenzování. První z nich je uvažovat dle vztahu (1) na str. 12 akumulaci el. energie z období s dobrými světelnými podmínkami na dny s horšími. Druhá cesta je použít akumulátor pro akumulaci el. energie na max. 2 dny činnosti napájené aplikace a zajistit takový výkon PV kolektorů, aby byly schopny požadované množství energie dodat i ve dnech s horšími světelnými podmínkami.

Výhody druhé cesty jsou především ve větší účinnosti celého systému (odpadají ztráty v akumulaci) a ekonomický efekt v použití levnějších akumulátorů s nižší kapacitou. Těchto akumulátorů je vzhledem k jejich životnosti (3 až 5 let) a životnosti PV systému (kolektory více jak 20 let, elektronika více jak 10 let) potřeba několik. Nevýhodou je naopak vyšší pořizovací cena PV kolektorů, kterých je potřeba více. Rovněž dochází k malému využití těchto kolektorů v případě dobrých světelných podmínek. Toto řešení je spíše vhodné pro aplikace, kde zle v případě dobrých světelných podmínek využít energii i jinak (čerpání vody, diagnostické činnosti systému apod.).

### 6.4 Koncepce solárního regulátoru

Na základě poznatků z testování solárních regulátorů byla navržena koncepce solárního regulátoru. Regulátor řídí nabíjecí proud pomocí PWM na základě měřeného proudu. Překročí-li hodnota proudu hranici pro bezpečné nabíjení, je aktivován lineární zdroj proudu jako proudové omezení (v jednodušším případě předřadný rezistor) řešený jako součást regulátoru či jako samostatný modul. Střední hodnota nabíjecího proudu je vypočtena z informace o stavu nabití akumulátoru na základě jeho svorkového napětí. Tato hodnota je porovnávána ze skutečnou hodnotou nabíjecího proudu, závislém na intenzitě osvětlení. Na základě rozdílu požadované a skutečné hodnoty je upravována střída PWM. Při určité střídě PWM, kdy energie v okamžiku odpojeného PV kolektoru k akumulátoru dosahuje určité hodnoty, je aktivován výstup pro bivalentní spotřebič (akumulátor).

Regulátor má tři výstupy pro spotřebiče a jeden signalizační výstup. Při postupném vybíjení akumulátoru je nejprve odpojen sekundární výstup, z něhož jsou napájeny méně důležité

---

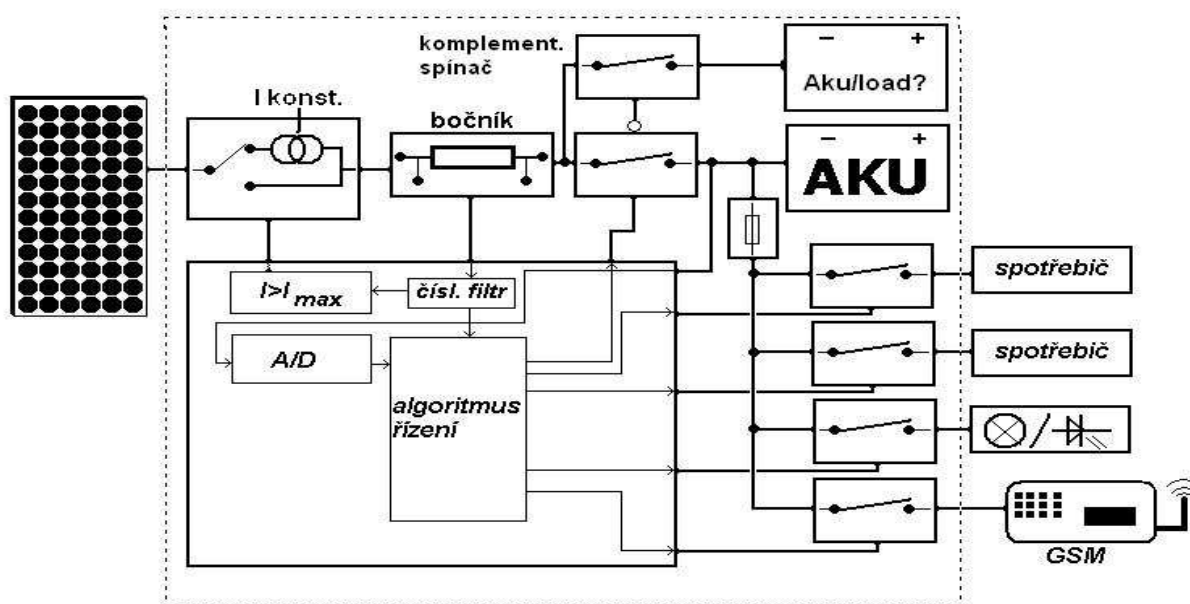
<sup>3</sup> Předimenzovaný v kontextu k činnosti za dobrých světelných podmínek. Pro činnost za horších podmínek je takovýto systém „dimenzovaná správně“.

spotřebiče. Při dosažení hranice vybitého akumulátoru jsou odpojeny zbývající spotřebiče a vypnut signál pro osvětlení. Ten je do té doby v závislosti na stupni nabití akumulátoru modulován tak, aby se snižoval postupně jas osvětlení v rozsahu 100%-70%.

Při dosažení stavu vybití je aktivován signalizační výstup pro informaci o poruchovém stavu (např. pomocí GSM sítě), zapnutí bivalentního zdroje energie, popř. pro jiné účely.

Výstup pro spotřebiče s vyšší prioritou, popř. všechny výstupy jsou opatřeny (v rámci konstrukce regulátoru či formou modulu) vratnou elektronickou pojistkou.

Blokové schéma této koncepce solárního regulátoru je na obr. 49.



**Obr. 49**

*Koncepce solárního regulátoru pro použití v ostrovním PV systému vypracovaná na základě zkušeností z testovaných regulátorů*

## 7. Závěr práce

Podklady k vypracování této diplomové práce byly shromážděny prací na pokusném ostrovním fotovoltaickém systému na katedře fyziky ČZU v Praze, v rámci mého působení na pozici pomocné vědecké síly. Cílem diplomové práce bylo sestavení a testování ostrovního PV systému, se zaměřením na činnost a porovnání několika typů solárních regulátorů.

Prvním vyvinutým a testovaným regulátorem byl analogový solární regulátor. Jeho činnost během testování plně odpovídala teoretickým úsudkům. Regulátor nabíjel akumulátor šetrně a z principu jeho funkce zde nehrozí nebezpečí přebíjení akumulátoru. Ten tak může být připojen nepřetržitě a udržován na hodnotě plně nabitého akumulátoru. Nevýhodou je menší účinnost nabíjení. Tento regulátor je tak vhodný pro aplikace s malým či občasným odběrem el. energie, kde je důležité udržovat akumulátor ve stále připraveném stavu. Typickým příkladem tak může být nouzové dálniční pojítka, monitorovací body produktovodů, signalizační zařízení občasného použití atd. PV systém s tímto regulátorem se během testování vyznačoval mimořádnou spolehlivostí a šetrným způsobem nabíjení akumulátoru.

Dalším vyvinutým solárním regulátorem testovaným na pokusném systému byl regulátor s dvoustavovou regulací nabíjecího proud. I tento regulátor pracoval dle teoretických odhadů, ale nevhodným průběhem v konečných fázích nabíjení je vhodný pro situace s velkou a častou spotřebou el. energie. Tedy situaci, kdy bude akumulátor po většinu své činnosti nabíjen a situace tzv. udržovacího nabíjení nebude dlouhodobá. Co se týče funkce a spolehlivosti, byl i prototyp tohoto regulátoru po celou dobu činnosti v souladu s požadavky.

Třetím vyvinutým a testovaným regulátorem byl regulátor s regulací proudu pomocí PWM. Tento regulátor odstraňuje chyby předchozího typu a dosahuje i větší účinnosti během nabíjení. U tohoto regulátoru je prostor pro programovou architekturu, díky níž lze adaptovat řídicí algoritmus na potřeby konkrétního typu PV systému, tj. použitého PV kolektoru, akumulátoru a spotřebiče. Během testování byl navržen jednoduchý univerzální algoritmus řídicí nabíjecí proud na základě stupně nabití akumulátoru se zpětnou vazbou. I tento regulátor pracoval během testování bezchybně. Použití tohoto solárního regulátoru je předpokládáno v aplikacích, kde je odběr elektrické energie větší či trvalý a je proto nutné zajistit co největší účinnost nabíjení. Jak bylo popsáno v práci, díky charakteristice PV kolektorů a činnosti tohoto regulátoru je účinnost nabíjení optimální.

Částí testování solárních regulátorů bylo i stanovení energetické bilance. Ta vyjadřuje, jaké množství el. energie (W.h, A.h) je ostrovní PV systém v závislosti na použitém solárním regulátoru schopen dodat napájené aplikaci. Z prvních měření je sestavena tabulka (tab. 6.1) znázorňující možnosti napájení za vybraných meteorologických podmínek na jednotlivých

typech regulátoru. Zároveň byla dlouhodobým provozem PV systému odzkoušena experimentálně hodnota trvalého odběru z akumulátoru o hodnotě 200mA (2,4W).

Celkově lze říci, že experimentální provoz ostrovního PV systému se osvědčil a poukázal na vhodnost využití solární energie k napájení různých aplikací na odlehlých místech.

Výsledky výzkumu související s činností ostrovního PV systému a s některými blízkými tématy byly publikovány v odborných a vědeckých časopisech a referovány na mezinárodních vědeckých konferencích.

Výzkum byl součástí výzkumného záměru: M3M 6046070905

## **8. Seznam použité literatury**

- [1] *Obnovitelné zdroje energie a možnosti jejich uplatnění v ČR*, ČEZ, Praha, (2003)
- [2] M. Libra, V. Poulek, *Solární energie*, ČZU, Praha, (2006), ISBN 80-213-1488-5
- [3] J.M.Gordon, Hovad J. Wenger,... *Solar Energy*, 46,4, (1991), pp. 211-217
- [4] J.Mareš, *Dobíjení akumulátorů elektrické energie v ostrovních PV systémech*, bakalářská práce TF ČZU, Praha, (2006)
- [5] M. Cenek, J. Jindra, M. Jon, J. Kazelle, J. Kozumplík, J. Vrba, *Akumulátory od principu k praxi*, FCC public, Praha, (2003), ISBN 80-86534-03-0
- [6] J.Mareš, M. Libra, *Testování solárního regulátoru v malém fotovoltaickém systému*, *Jemná mechanika a optika*, 10, (2007), str. 292-294
- [7] J. Mareš, *Solární nabíječka pro akumulátor 12V*, *Praktická elektronika* 5, (2007), str. 19-20, ISSN 1211-328X
- [8] J.Mareš, *Řízení velikosti nabíjecího proudu pomocí PWM*, *Praktická elektronika* 8, (2005), str. 32, ISSN 1211-328X
- [9] J. Mareš, *Regulátor k LED*, *Praktická elektronika* 7, (2007), str. 24, ISSN 1211-328X
- [10] J.Mareš, M.Libra, J. Matějka, *Teplotní závislost napětí PV článků*, *Jemná mechanika optika*, v tisku (2008)
- [11] *Technický list akumulátorů Akuma*, Akuma a.s. (2007)

## 9. Seznam vyobrazení

str.



<b>Obr.1</b> Stanice meteorologické služby napájená pomocí PV ostrovního systému. Rakouské Alpy. Foto J. Mareš.	6.
<b>Obr. 2.</b> Voltampérová charakteristika osvětleného fotovoltaického článku (pro tři různé intenzity osvětlení).	7.
<b>Obr. 3</b> Sklon energetických hladin v křemíku	8.
<b>Obr. 4</b> Závislost napětí na prázdko na osvětlení	9.
<b>Obr. 5</b> Jednoduché schéma ostrovního fotovoltaického systému	10.
<b>Obr. 6</b> Idealizovaná závislost výkonu PV systému v průběhu dne	13.
<b>Obr. 7</b> Nákladová funkce při dimenzování vodičů PV systémů	14.
<b>Obr.8</b> Jednoduché regulátory napětí	15.
<b>Obr. 9</b> Princip ochrany akumulátoru proti hlubokému vybití	15.
<b>Obr.10</b> Indikátor 753R pro bezdrátovou komunikaci s PV napájením	16.
<b>Obr. 11</b> Náskres systému využívajícího akumulace energie z PV kolektorů do vodíku	18.
<b>Obr.12</b> Akumulace el. energie do akumulátoru v mobilním dopravním systému	19.
<b>Obr. 13</b> Uspořádání pokusné sestavy ostrovního PV systému na katedře fyziky TF ČZU v Praze	20.
<b>Obr. 14</b> Volt-ampérová charakteristika PV panelu při jasném slunečném letním dni	21.
<b>Obr. 15</b> Závislost $P=f(U)$ a $U=f(I)$ fotovoltaického panelu 12V/100W	22.
<b>Obr. 16</b> V-A charakteristika PV panelu na intenzitě osvětlení a závislost polohy bodu max. výkonu na intenzitě osvětlení.	23.
<b>Obr. 17</b> Použití olověného startovacího akumulátoru 12V/55A.h v testovacím PV systému na katedře fyziky ČZU v Praze	25.
<b>Obr.18</b> Akumulátor 12V 105 A.h určený speciálně pro použití v PV aplikacích	26.
<b>Obr. 19</b> Blokové schéma solárního regulátoru pracující v režimu nabíjení na konstantní napětí	28.
<b>Obr. 20</b> Spínaný zdroj konstantního napětí	29.
<b>Obr.21</b> Pravoúhlá V-A výstupní charakteristika regulátoru	29.
<b>Obr.22</b> Schéma zapojení regulátoru nabíjení na konstantní napětí, použitého v PV ostrovním systému testovaném na katedře fyziky ČZU v Praze	31.
<b>Obr. 23</b> Záznam vybraných parametrů během počátku nabíjení nabíjecí charakteristikou „U“ v pokusném PV ostrovním systému (měřeno 24.7.07)	32.
<b>Obr. 24</b> Záznam vybraných parametrů během počátku nabíjení nabíjecí charakteristikou „U“ v pokusném PV ostrovním systému (měřeno 12.9.07)	34.

<b>Obr. 25</b> Záznam vybraných parametrů PV ostrovního systému během odpoledne s proměnnou oblačností (měřeno 7.6.07)	35.
<b>Obr. 26</b> Zapojení tzv. proudového zrcadla jako zdroje konstantního proudu	36.
<b>Obr. 27</b> Výřez průběhu napětí akumulátoru během dvoupolohové regulace nabíjení.	37.
<b>Obr. 28</b> Blokované schéma solárního regulátoru s dvoupolohovou regulací nabíjecího proudu	38.
<b>Obr. 29</b> Denní záznam vybraných parametrů při nabíjení akumulátoru s využitím dvoupolohové regulace	39.
<b>Obr. 30</b> Neupravený záznam nabíjení akumulátoru s regulací nabíjecího proudu spínáním	40.
<b>Obr. 31</b> Záznam vybraných parametrů nabíjení. Pro grafickou a zjednodušenou numerickou analýzu provedena filtrace platných obálek průběhů. (měřeno 8.10.07)	41.
<b>Obr. 32</b> Záznam průběhu nabíjení ve větším časovém rozlišení	42.
<b>Obr. 33</b> Denní záznam vybraných parametrů nabíjení po filtraci	43.
<b>Obr. 34</b> Poměr střídny určující střední hodnotu proudu	44.
<b>Obr. 35</b> Blokované schéma solárního regulátoru s PWM.regulací nabíjecího proudu	45.
<b>Obr. 36</b> Blokované schéma solárního regulátoru s funkcí omezení nabíjecího proudu	45.
<b>Obr. 37</b> Omezení nabíjecího proudu	46.
<b>Obr. 38</b> Omezení nabíjecího proudu lineárním zdrojem proudu	46.
<b>Obr. 39</b> Záznam vybraných parametrů nabíjení se solárním PWM regulátorem	47.
<b>Obr. 40</b> Časový průběh odpojování spotřebičů	49.
<b>Obr. 41</b> Využití energie v PWM řízení nabíjecího proudu pro druhý spotřebič	49.
<b>Obr. 42</b> Blok DC/DC měniče pro funkci MPPT v solárním systému	50.
<b>Obr. 43</b> Principiální schéma DC/DC měniče	51.
<b>Obr. 44</b> Grafický průběh závislosti napětí akumulátoru na stupni nabití (při teplotě elektrolytu 20°C).	53.
<b>Obr.44</b> Vybrané možnosti úpravy napětí akumulátoru pro zpracování A/D převodníkem v solárním regulátoru	53.
<b>Obr. 46</b> Pokles napětí akumulátoru po ukončení nabíjení	54.
<b>Obr. 47</b> Upravené náhradní schéma akumulátoru o vnitřní kapacitu	54.
<b>Obr. 48</b> Vícedenní záznam napětí akumulátoru v ostrovním PV systému s trvalým odběrem	57.

**Obr. 49** Koncepce solárního regulátoru pro použití v ostrovním PV systému vypracovaná na základě zkušeností z testovaných regulátorů 60.