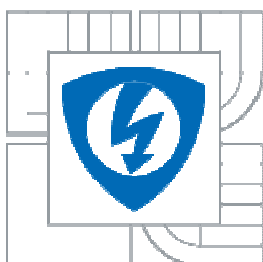




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TEHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

FOTOVOLTAICKÝ SYSTÉM PRO RAPS APLIKACE

PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR RAPS APLICATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Miroslav Nevoral

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Petr Křivík, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Miroslav Nevoral
Ročník: 2

ID: 77951
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Fotovoltaický systém pro RAPS aplikace

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou fotovoltaických panelů a fotovoltaických systémů pro RAPS aplikace.

Osvojte si základy práce s programem VEE Pro 8.0.

Sestavte fotovoltaický systém s fotovoltaickým modulem, akumulátorem a proměnnou zátěží.

Sestavte a zprovozněte automatizované měřicí pracoviště pro testování fotovoltaického systému včetně měřicího programu.

Vyhodnoťte charakteristiky fotovoltaického systému při různých režimech provozu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Petr Křivík, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Na začátku této práce jsou uvedeny základní principy fotovoltaických článků, jejich výhody a nevýhody a dále je zde uveden přehled fotovoltaických systémů. Další část této práce se zabývá problematikou olověných akumulátorů, následuje praktická část zabývající se měřením VA charakteristik. Hlavním cílem této práce je tvorba experimentálního FV systému. Tento systém se skládá z FV modulu, akumulátoru (je složen ze dvou sériově spojených článků o výsledném napětí 5V), dále z proměnné zátěže (složené z devatenácti rezistorů s hodnotami odporu od jednotek až po stovky Ohmů). Tento systém je propojen s počítačem, na kterém jsou nainstalovány ovládací programy, které byly sestaveny v simulačním programu VEEPro8.0. Měření lze provádět dvěma způsoby. První je, že obsluha bude nastavovat kombinace zatěžovacích odporů manuálně a druhým způsobem je to, že obsluha pouze spustí měření a kombinace zatěžovacích odporů budou voleny programem automaticky. Výsledkem je automatizované pracoviště pro měření VA charakteristik fotovoltaických panelů.

Abstract

The beginning of this work presents the basic principles of photovoltaic cells, their advantages and disadvantages. There is also an overview of photovoltaic systems. The next part takes a closer look on lead-acid accumulators followed by a practical part regarding the measurement of VA characteristics. The main goal of this work is to assemble an experimental PV system. It will consist of a PV module, an accumulator (consisting of two cells connected in series and producing an overall voltage of 5V) and of a variable load (assembled from nineteen resistors with resistance varying from units to hundreds of Ohms). This system is connected to a computer that runs the control software which was created using the VEEPro8.0 simulation environment. The measurements can be taken in two ways. Either the operator can select the load resistor combinations manually, or the operator only launches the measurement and the load is selected automatically by the software. This way we obtain an automatized workplace for measuring VA characteristics of photovoltaic panels.

Klíčová slova

RAPS aplikace, fotovoltaický systém, fotovoltaické charakteristiky

Key words

RAPS applications, photovoltaic system, photovoltaic characteristics

Bibliografická citace díla:

Bc. NEVORAL, M. *Fotovoltaický systém pro RAPS aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Křivík, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 11.05. 2011.

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu Diplomové práce Ing. Petru Křivíkovi, Ph.D. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v této Diplomové práci a za pomoc při řešení teoretických a technických problémů.

Obsah

1	Cíle práce	8
2	Úvod do problematiky	8
3	Olověné akumulátory	8
3.1	Základní chemické reakce	9
3.2	Fyzikální veličiny	10
3.3	Stavební prvky klasických olověných akumulátorů	11
3.3.1	Nádoba	11
3.3.2	Víko nádoby akumulátoru	11
3.3.3	Pólové nástavce	11
3.3.4	Články akumulátoru	12
3.3.5	Separátor	12
3.3.6	Elektrolyt	12
3.3.7	Elektrody	13
3.4	Závady vznikající při provozu olověných akumulátorů	13
3.4.1	Hluboké vybíjení	13
3.4.2	Sulfatace	13
3.4.3	Přebíjení	14
3.4.4	Velmi rychlé nabíjení	14
4	Fotovoltaika	14
4.1	Úvod do fotovoltaiky	14
4.2	Fotovoltaické články	15
4.2.1	Princip fotovoltaického článku	15
4.2.2	Výhody a nevýhody fotovoltaického článku	17

4.3	Fotovoltaické systémy	18
4.3.1	Typy fotovoltaických systémů	20
5	Praktická část	23
5.1	Popis měřicího pracoviště	23
5.1.1	Olověný akumulátor.....	23
5.1.2	Moduly se zatěžovacími rezistory.....	24
5.1.3	Bočníky pro měření proudu.....	25
5.1.4	Solární panel	26
5.1.5	Měřič EMRSI	28
5.1.6	Digitální multimetr Agilent 34405A, multiplexer Agilent 4421A a switch Agilent 4437A.....	32
5.1.7	PC s měřicími programy	32
5.2	Popis experimentů a výsledky měření	37
5.2.1	Experiment č.1	37
5.2.2	Experiment č. 2	41
6	Závěr.....	54
7	Seznam použité literatury.....	55
8	Seznam obrázků	56

1 Cíle práce

Hlavním cílem této práce je sestavení a zprovoznění automatizovaného měřicího pracoviště pro testování fotovoltaického systému, seznámení se se simulačním programem VEEPro8.0 a dále tvorba a optimalizace měřicího SW v prostředí VEEPro8.0 pro měření fotovoltaických charakteristik.

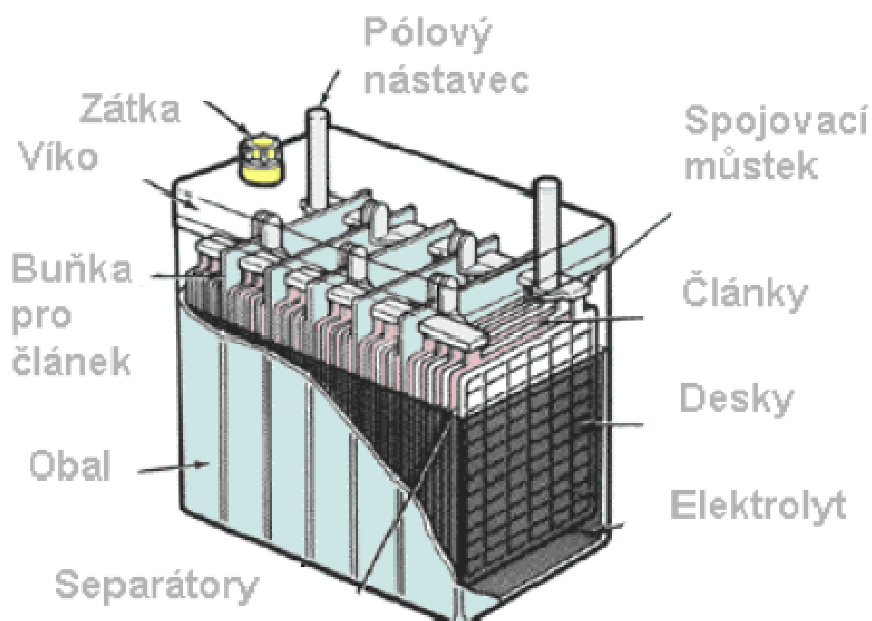
2 Úvod do problematiky

Na začátku si musíme nejprve říci, jaký je rozdíl mezi klasickým a obnovitelným zdrojem energie. Obnovitelný zdroj energie je takřka nevyčerpatelný (pohybujeme se v horizontu asi 1000 let), například země, vítr, voda, biomasa, energie ze Slunce. Klasické zdroje (primární) jsou zdroje vyčerpatelné, které mají omezené zásoby např. fosilní paliva (černé a hnědé uhlí, zemní plyn, ropa, ale i například uran – jaderné palivo). Pokud se alespoň někdy rozhlédneme kolem sebe, je jasné, že vyčerpatelných zdrojů velmi rychle ubývá v důsledku stále větší spotřeby elektrické energie, a proto je nutné začít s tímto problémem bojovat. Proto se v posledních asi 15 letech začínají stále více využívat zdroje obnovitelné, i když zatím nemají takovou účinnost oproti klasickým zdrojům. Proto je v současné době velký zájem o problematiku fotovoltaiky a s tím spojené využívání fotovoltaických panelů na nejrůznějších místech světa a v nejrůznějších podmínkách. Lze říci, že fotovoltaika, jako vědní obor, je poměrně mladou záležitostí. Výzkumem v oblasti fotovoltaiky se zabývá např. Evropská Unie a Spojené státy americké.

3 Olověné akumulátory

Obecně lze konstatovat, že olověný akumulátor je sekundární článek → elektrochemický zdroj energie, který lze opětovně nabíjet, nabíjením se v článku ukládá elektrická energie z čehož pochází název „akumulátor“. Skládá se ze záporných a kladných elektrod a elektrolytu kterým je kyselina sírová H_2SO_4 zředěná destilovanou vodou. Toto jsou dvě základní části olověného akumulátoru, ale pochopitelně nesmějí chybět zátky (neplatí u bezúdržbových akumulátorů), dále pólové nástavce pro připojení do elektrického obvodu, kladné a záporné elektrody se separátory mezi nimi. V neposlední řadě toto všechno kromě pólových nástavců a zátek je umístěno v plastovém obalu, odolávajícímu dlouhodobému působení kyseliny sírové H_2SO_4 , uzavřeném

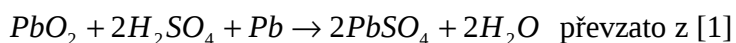
víkem. Na víku jsou zátky pro dolévání destilované vody a měření hustoty elektrolytu hustoměrem (neplatí pro bezúdržbové akumulátory) [2]. **Obr.1** ilustruje složení olověného akumulátoru.



Obr. 1: Znázornění konstrukce olověného akumulátoru [2]

3.1 Základní chemické reakce

Reakce probíhající při vybíjení olověných akumulátorů popisuje rovnice:

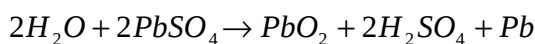


Z této rovnice je patrné, že při vybíjení dochází k tvorbě síranu olovnatého PbSO_4 , z původní aktivní hmoty, a vody za současného spotřebovávání kyseliny sírové. Touto reakcí se elektrolyt zředňuje [1], [2].

V průběhu vybíjení dochází k mechanickému namáhání elektrod v důsledku tvořícího se síranu olovnatého, který se vyznačuje větším objemem narozdíl od původní aktivní hmoty. Dále se zmenšuje i poréznost elektrod a zpomaluje se difúze iontů H_2SO_4 do aktivních hmot – hustota kyseliny v aktivních hmotách klesá proti hustotě kyseliny v elektrolytu – tato skutečnost je

závislá na velikosti vybíjecího proudu, tloušťce elektrod a vybití akumulátoru. Síran olovnatý $PbSO_4$ vykazuje velmi špatnou vodivost a tím pádem vzrůstá vnitřní odpor akumulátoru [1].

Reakce probíhající při nabíjení olověných akumulátorů popisuje rovnice:



Jedná se tedy o přesně opačnou reakci oproti vybíjení. Dochází zde k redukci vody a síranu olovnatého. Na kladných deskách tvoří volný kyslík spolu s olovem oxid olovičitý. Dochází k přemísťování síranu olovnatého do elektrolytu a spolu s vodíkem tvoří kyselinu sírovou [2], [3].

V průběhu nabíjení dochází v důsledku úbytku síranu ke zvětšování pórů aktivních hmot na elektrodách, celkový vnitřní odpor klesá. Při nabíjení může dojít k situaci, že je akumulátor přebíjen. Oxid olovičitý PbO_2 je charakterizován malou soudržností. V důsledku unikajících plynů z pórů aktivní hmoty dochází k utrhávání částic z povrchu kladné elektrody. Čím více plynů uniká, tím větší poškození je patrné na kladných elektrodách [1].

3.2 Fyzikální veličiny

Jedná se o veličiny, kterými jsme schopni popsat olověný akumulátor [1], [3] a to:

Jmenovité napětí - udává se jako 2V na článek

Kapacita akumulátoru - udává se nejčastěji v ampérhodinách

$$C_{Ah} = I \cdot t \text{ (součin vybíjecího proudu [A] a vybíjecí doby [h]) [Ah]}$$

-závislá na intenzitě vybíjecího proudu a na teplotě

Účinnost akumulátoru - udává jak efektivní je akumulátor při uchovávání elektrické energie

-klesá se zvýšením nabíjecího a vybíjecího proudu a poklesem teplot

-u olovněných akumulátorů se dosahuje při C_{Ah} až 85% a C_{Wh} 65% účinnosti

Napětí akumulátoru v klidu - jedná se o skutečnou hodnotu napětí, kterou lze změřit v momentu, když akumulátor není ani nabíjen ani vybíjen

- změřený údaj je závislý na teplotě a na hustotě elektrolytu

Životnost – je dána hodnotou kapacity akumulátoru, pod kterou nesmí kapacita v průběhu nabíjecích a vybíjecích cyklů klesnout

Měrná energie - udává jaké množství elektrické energie můžeme získat z hmotnosti 1 kg nebo objemu 1 dm³ chemického zdroje proudu při jeho vybití za jmenovitých podmínek

3.3 Stavební prvky klasických olověných akumulátorů

V této kapitole si stručně popíšeme prvky, ze kterých se skládají klasické olověné akumulátory [2].

3.3.1 Nádob

Jedná se v podstatě o ochranný obal, který slouží i jako nádržka s elektrolytem. Materiálem používaným pro výrobu nádoby bývá tvrzená pryž, polypropylen a další. U průhledných materiálů lze, pomocí rysek umístěných např. uvnitř nádoby, kontrolovat hladinu elektrolytu. V nádobě jsou vytvořeny tzv. „buňky“, ve kterých jsou uloženy jednotlivé články. Články ovšem nejsou uloženy na dně, ale nade dnem, aby se zabránilo zkratům vzniklým případným odpadáváním aktivních hmot z desek. Žebra též slouží jako výztuž nádoby.

3.3.2 Víko nádoby akumulátoru

Víko je pevně spojeno s nádobou přilepením, svařením nebo zaasfaltováním. Představuje ochranu proti prachu a zabraňuje vstupu ohně z okolního prostředí do nádoby. Na víko jsou umístěny zátky a u některých baterií i přetlakové ventily. Součástí víka již dnes standardně bývá i rukojeť pro snadnou manipulaci s akumulátorem.

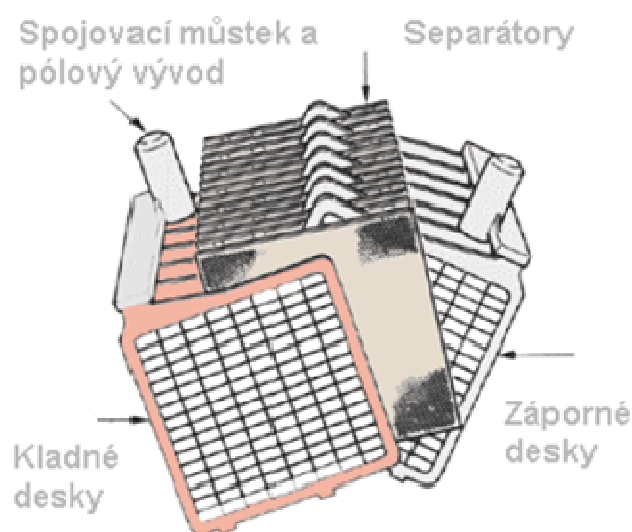
3.3.3 Pólové nástavce

Jak již bylo řečeno, slouží pro připojení akumulátoru do elektrického obvodu např. v automobilu. Bývají v různých provedeních, nejčastěji však mívají kuželovitý tvar. Kladný pól

nese označení „+“ a má větší průměr. Záporný pól se označuje „-“ a má oproti kladnému pólu průměr menší. K těmto nástavcům se připojují kabely pomocí šroubovacích svorek.

3.3.4 Články akumulátoru

Článek bývá složen z více kladných a záporných elektrod, které jsou paralelně spojeny a jsou odděleny pomocí separátorů viz. **obr. 2**. Každý článek musí mít dva kontakty pro propojení se sousedním článkem. Takto vznikne celý akumulátor.



Obr. 2: Konstrukční uspořádání článku akumulátoru [2]

3.3.5 Separátor

Izolační porézní materiál, kterým elektrolyt může procházet a zároveň brání styku kladné a záporné desky ve článku akumulátoru, tedy zamezuje vzniku zkratu. Materiálem separátoru bývá impregnovaný papír nebo plastická hmota odolná vůči kyselině sírové. Jeho životnost je větší než životnost akumulátoru.

3.3.6 Elektrolyt

Elektrolyt je látka, která je schopna vést elektrický proud a podílí se na chemických reakcích v článku. Je to roztok kyseliny sírové H_2SO_4 a destilované vody. Při používání akumulátoru dochází k částečnému vypařování destilované vody, která musí být doplňována. Kyselina sírová se za normálních podmínek nedoplňuje.

3.3.7 Elektrody

O elektrodách lze říci, že jsou nejdůležitější částí celkové konstrukce akumulátoru, protože ve velké míře určují konečné vlastnosti daného akumulátoru. Existují elektrody kladné a elektrody záporné. Kladné elektrody, **obr. 3**, mají jinou konstrukci, více se podílejí na celkových vlastnostech akumulátoru než záporné elektrody. Jedná se o olověné desky houbovitě struktury pokryté PbO_2 . Existují různé typy kladných elektrod např. velkopovrchové, mřížkové či trubkové. Záporné elektrody se vyznačují jednodušší konstrukcí, jejich povrch tvoří čisté olovo a jsou méně namáhané než kladné elektrody.



Obr. 3: Příklad kladné elektrody [4]

3.4 Závady vznikající při provozu olověných akumulátorů

3.4.1 Hluboké vybíjení

Hluboké vybíjení může mít dvě příčiny. První příčinou je to, že akumulátor je vybíjen pod mezní hodnotu vybíjecího napětí, kterou určí výrobce (odlišnou dle typu akumulátoru). Druhou příčinou je vybíjení velmi malými proudy, při kterém dochází k nepatrnému poklesu napětí akumulátoru, i když je již plně vybit. Pro měření stupně vybití je vhodné použít hustoměr a změřit hustotu elektrolytu u každého článku [4].

3.4.2 Sulfatace

Při sulfataci dochází k přeměně drobných krystalků síranu olovnatého na krystalky větší v důsledku skladování ve vybitém stavu. Síran olovnatý má větší objem než původní aktivní hmoty, tím pádem klesá s přibýváním sulfátu poréznost elektrod a dochází ke zhoršení průchodu elektrolytu póry do aktivních hmot. Nízká elektrická vodivost sulfátu zvyšuje podstatně vnitřní

odpor akumulátoru. Sulfataci podléhají zejména záporné elektrody. Příčinou může být např. znečištění elektrolytu nebo samovolné vybíjení akumulátoru po dlouhou dobu. Pokud se baterie nachází ve stavu sulfatace, je nutné provést operace zajišťující odstranění síranu, např. vylít elektrolyt, akumulátor propláchnout destilovanou vodou a poté články akumulátoru ponořit do destilované vody a nabíjet přibližně třetinovým nabíjecím proudem. Průběžně bychom měřili kapacitu akumulátoru. Ale toto by bylo možné udělat pouze s krátkodobě sulfatovaným akumulátorem, který by ještě šlo zachránit. V opačném případě by musel být vyřazen z provozu [1], [4], [5], [6].

3.4.3 Přebíjení

Přebíjení je stav, kdy nabíjení akumulátoru probíhá i po dosažení znaků plného nabití, je-li akumulátoru dodáváno více elektrické energie, než potřebuje k pokrytí ztrát vznikajících při samovolném vybíjení. Důsledkem přebíjení může být rozpad kladných elektrod, může docházet ke vzniku zkratů apod. [1], [5].

3.4.4 Velmi rychlé nabíjení

Rychlé nabíjení vysokými nabíjecími proudy se obecně moc nedoporučuje. Avšak lze jej použít na počátku nabíjení takovým způsobem, aby nebylo překročeno napětí 2,40 V na článek a teplota nestoupala nad 40 °C. Pokud se toto nedodrží, klesá účinnost nabíjení, stoupá teplota elektrolytu a tím se zrychlují vedlejší chemické reakce a výrazně se snižuje životnost akumulátoru [1], [4], [7].

4 Fotovoltaika

4.1 Úvod do fotovoltaiky

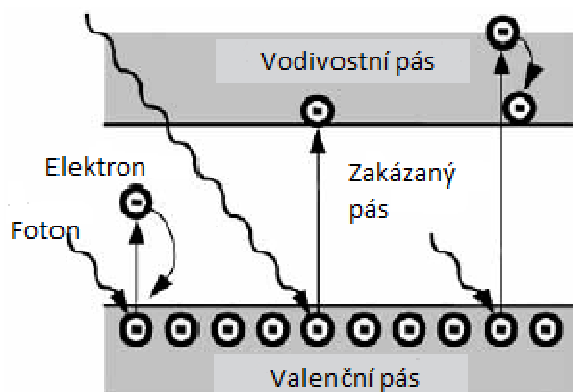
Pojem fotovoltaika vznikl spojením dvou slov. Foto z řeckého slova *photós* (světlo) a ze slova volt podle italského fyzika Alessandra Volty. Fotovoltaika je tedy přímá přeměna energie slunečního záření na energii elektrickou, stala se jedním z nejrychleji se rozvíjejících oborů (v celosvětovém měřítku). Bereme v úvahu několik desítek procent instalovaného příkonu za rok. Z hlediska vývojových trendů se význam fotovoltaiky jako energetického zdroje neustále zvyšuje. Od svého objevu v roce 1839 Alexandrem Edmondem Bequielem se stal fotovoltaický

jev zajímavým objektem pro fyzikální bádání. K většímu využívání fotovoltaiky došlo až v 60. letech minulého století s nástupem kosmonautiky (sluneční články jako zdroje elektrické energie pro kosmické stanice a průzkumné sondy). Hlavním materiálem používaným při výrobě solárních článků je stále křemík, ale i další materiály, které byly vyvinuty, a to buď pro jejich potenciál na snížení nákladů nebo jejich potenciál pro vysokou účinnost. Křemík je druhým nejčastějším prvkem vyskytujícím se v zemské kůře po kyslíku, ale nemůže se nacházet v chemicky čisté formě. V posledních desetiletích se náklady na výrobu fotovoltaických panelů výrazně snížily, avšak náklady na výrobu „fotovoltaické elektřiny“ jsou stále vyšší než náklady na výrobu elektrické energie konvenčními elektrárnami. Vzhledem k vysokému tempu růstu v odvětví fotovoltaiky bude snižování nákladů na výrobu FV panelů pokračovat. V 70. letech minulého století vzrostl význam obnovitelných zdrojů elektrické energie a mezi které patří i energie ze Slunce. Fotovoltaické zdroje dnes můžeme bez problémů najít v různých oblastech lidské činnosti (kalkulačky, zdroje energie na nepřístupných místech, dodávky energie do rozvodné sítě apod.) [8], [9], [10].

4.2 Fotovoltaické články

4.2.1 Princip fotovoltaického článku

Jedná se v podstatě o polovodičovou diodu. Základem fotovoltaického článku je tenká křemíková destička s vodivostí typu P. Na destičce se při výrobě vytvoří tenká vrstva polovodiče typu N, vzniká přechod P-N. Při osvětlení článku vznikne v polovodiči vnitřní fotoelektrický jev, viz. **obr.4** (fyzikální jev, při němž jsou elektrony uvolňovány z látky v důsledku absorpce elektromagnetického záření, např. viditelného světla nebo rentgenového záření látkou) [9].



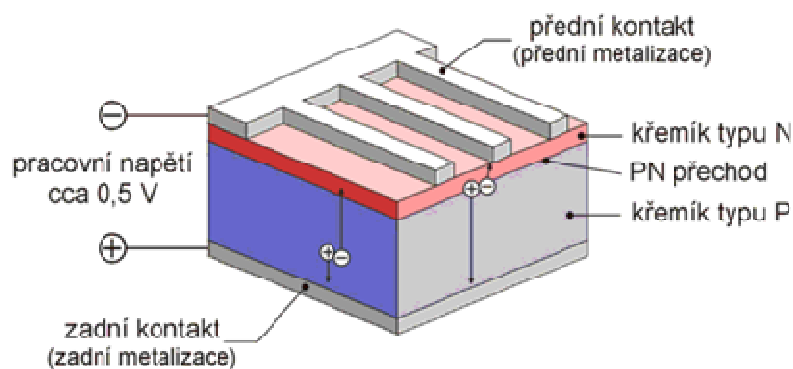
Obr. 4: Znázornění vnitřního fotoelektrického jevu znázorňujícího přechod elektronů z valenčního do vodivostního pásu přes zakázaný pás v důsledku dopadajícího záření [8]

Na přechodu P-N dochází ke vzniku elektrického napětí, které má u křemíkových článků velikost asi 0,5 V. Energie dopadajícího světla se v článku mění na energii elektrickou. Připojíme-li k článku zátěž (spotřebič), začne obvodem procházet stejnosměrný elektrický proud. Pokud budeme potřebovat vyšší elektrické napětí nebo proud, lze zapojit jednotlivé články sériově či paralelně. Tímto způsobem se sestavují fotovoltaické panely. Proud, který můžeme z fotovoltaického článku, resp. panelu odebírat, je úměrný velikosti ozařované plochy článku. Výkon křemíkových fotovoltaických článků o ploše 1 m² je 80 – 100 W. Účinnost přeměny světelné energie na energii elektrickou závisí jak na struktuře materiálu, tak na způsobu výroby článku, viz. **tab. 1** [9]. Vysvětlení principu solárního článku je též uvedeno na **obr.6**.

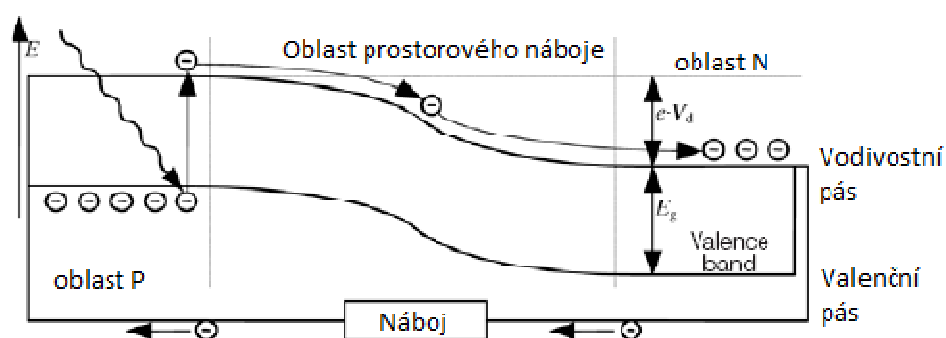
Křemíkový materiál	Laboratorní výroba (%)	Průmyslová výroba (%)	Barva
Monokrystalický	~ 24	14 až 17	černá
Polykrystalický	~ 18	13 až 15	modrá
Amorfní	~ 13	5 až 7	hnědá

Tab. 1: Účinnost přeměny světelné energie na elektrickou energii [9]

V současné době je nejběžnějším materiálem pro výrobu slunečních článků křemík a více než 80 % článků je vyráběno právě z krystalického křemíku. Struktura běžného křemíkového článku je znázorněna na **obr. 5**.



Obr. 5: Struktura křemíkového článku [10]



Obr. 6: Znázornění principu solárního článku na pásovém modelu energií [8]

4.2.2 Výhody a nevýhody fotovoltaického článku

Výhody fotovoltaického článku

- využití teoreticky nevyčerpatelného zdroje energie
- při jeho používání nevznikají žádné emise nebo jiné škodlivé látky
- tichý provoz, žádné pohyblivé díly (vyjma natáček solárních panelů)
- jednoduchá instalace solárního systému
- provoz nevyžaduje obsluhu
- snadná elektronická regulace

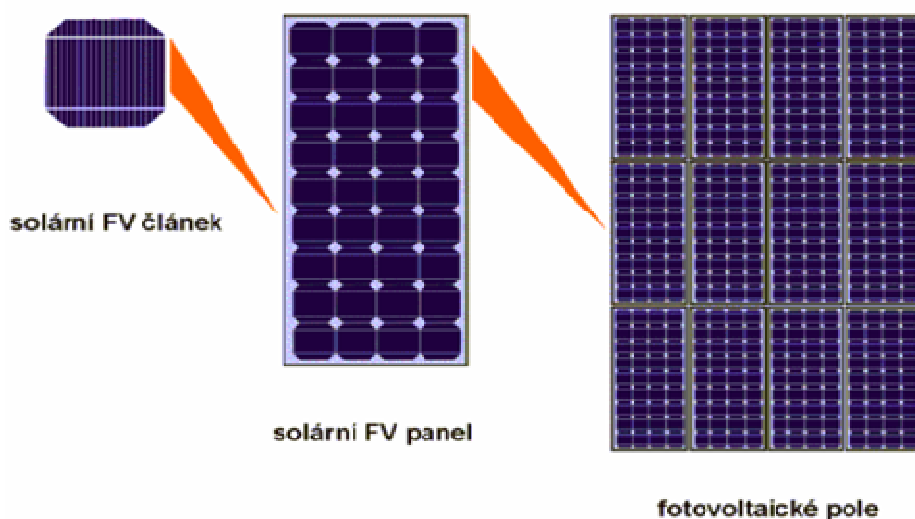
- vysoká provozní spolehlivost

Nevýhody fotovoltaického článku

- relativně nízká průměrná roční intenzita slunečního záření
- krátká průměrná roční doba slunečního svitu
- velké výkyvy intenzity záření v průběhu roku
- články mají malou účinnost přeměny => nároky na plochu článků
- finanční náročnost instalace
- poměrně krátká životnost (asi 20 let) v poměru k ceně a nutnost mít záložní zdroj elektrické energie

4.3 Fotovoltaické systémy

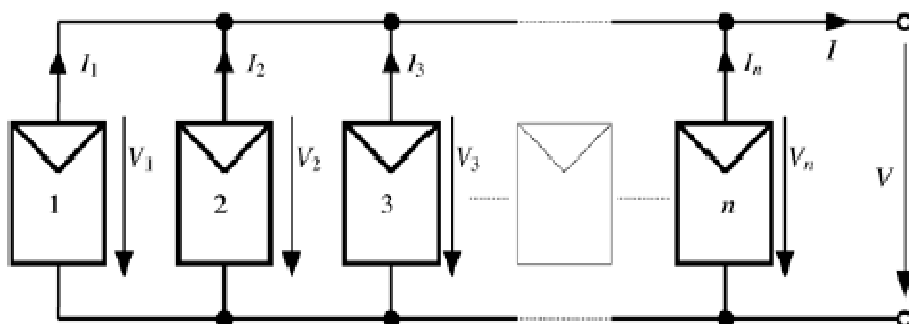
Jediný fotovoltaický článek má hodně omezené využití, jelikož jeho výkon a výstupní napětí je nízké. Proto se články spojují podle požadavků zákazníka a vzniká fotovoltaický modul nebo pole viz. **obr.7**. Tento modul nebo pole se instaluje například na polích, která jsou zemědělsky nevyužitá, na střechu budovy atd. Pro dosažení větší životnosti se moduly ukládají do hermeticky uzavřených pouzder, která jsou opatřena vysoce průhledným tvrzeným sklem. Tato úprava chrání moduly před povětrnostními vlivy a jejich udávaná životnost je 20 - 30 let [8], [9].



Obr. 7: Znárodnění fotovoltaického článku, panelu a fotovoltaického pole [11]

Většina panelů bývá rozdělena na několik stringů. Jeden string „pole“ mívá 18, 24, 36 nebo 40 článků spojených do série. Abychom jednotlivé stringy nebo články mohli ochránit před poškozením v důsledku přehřátí, jsou v panelech použity by-passové diody. Jejich význam spočívá v tom, že pokud by byl jeden článek v řetězci zastíněn, vzniklo by na něm závěrné napětí. Z článku se při jeho zastínění stává zátěž. V této situaci dochází k tomu, že by proud generovaný zbylými články v řetězci procházel zastíněným článkem. To by vedlo k jeho ohřevu a v mezních případech i k jeho zničení. Proto se by-passové diody připojují paralelně k řetězci sériově spojených článků. Při normálním provozu jsou diody neaktivní, ale v době zastínění článků nebo oblasti na panelu dojde k přemostění zastíněných článků a proud prochází přes diody. Tedy dochází k minimalizaci zahřívání a proudových ztrát vznikajících na zastíněných článcích. Ale i tak se stále jedná o nedokonalou ochranu, a proto se dnes již by-passové Schottkyho diody instalují přímo do jednotlivých buněk (článků). Tyto integrované diody byly poprvé vyrobeny firmou Sharp a vykazují výrazně nižší ztráty v době nehomogenního ozáření [8], [12].

Pozn.: Stále hovoříme o sériovém zapojení FV panelů, ale musíme brát v potaz i to, že se panely mohou zapojovat i paralelně, i když je to méně častá záležitost. Paralelní spojení panelů (článků), viz. **obr.8**, sice umožňuje získat větších proudů, ale je to spojeno s většími přenosovými ztrátami. V tomto zapojení mají všechny panely resp. články stejné napětí a přidáváním dalších panelů lze získat větší proudy. Ačkoliv je toto zapojení méně náchylné na poškození článků v důsledku nedokonalého osvětlení, používá se jen v několika málo případech (velké solární generátory) [8].

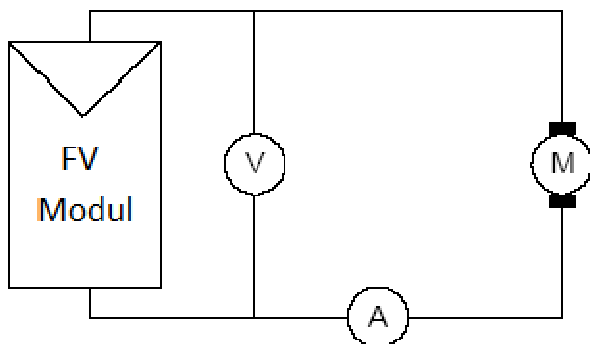


Obr. 8: Schématické znázornění paralelního spojení FV panelů, převzato z [8]

4.3.1 Typy fotovoltaických systémů

a) Nejjednodušší FV systém

Tento systém je složen z fotovoltaického modulu přímo spojeného se spotřebičem (v našem případě jde o motorek), viz. **obr. 9**. Pokud je intenzita slunečního svitu dostatečná, spotřebič funguje, akumulátor se nabíjí apod. Pokud intenzita osvětlení klesne pod určitou mez, spotřebič přestává fungovat. Tento systém se používá pro drobné aplikace např. kalkulačky, nabíječky atd. Trh s těmito drobnými jednoduchými FV systémy nabývá v posledních letech na významu → potřeba okamžitého dobíjení akumulátorů (mobilní telefony, fotoaparáty) takřka kdekoliv [9], [10].



Obr. 9: Schématické znázornění nejjednoduššího FV systému [11]

Fotovoltaické systémy lze rozdělit na systémy autonomní, ty jsou nezávislým zdrojem energie na rozvodné napájecí síti a na FV systémy přímo se sítí spojené.

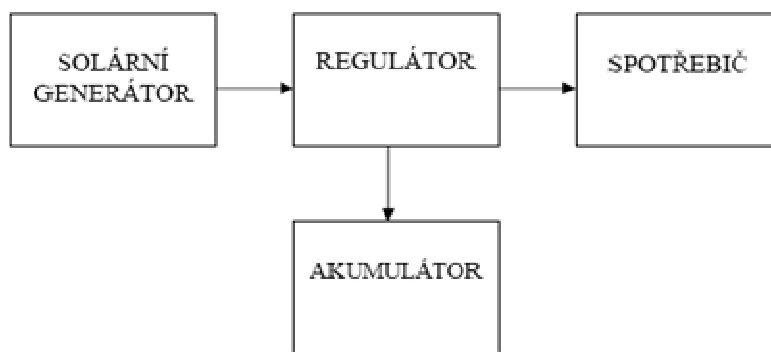
b) Autonomní FV systémy (ostrovní systémy)

Používají se na místech, kde není dostupná elektrická rozvodná síť nebo není ekonomické zřídit elektrickou přípojku (chaty na odlehlém místě, jachty atd.). Používají se na místech, kde potřebujeme střídavé napětí 230 V. Jedná se tedy zdroje energie nezávislé na rozvodné elektrické síti. Mohou být také označeny jako izolované solární systémy [9], [10].

Autonomní ostrovní systémy se dále dělí na [10]:

1. **Systémy s přímým napájením** – v podstatě se jedná o spojení solárního panelu a spotřebiče např. pro čerpání vody pro zavlažování

2. **Hybridní ostrovní systémy** – použití v místech celoročního provozu s poměrně velkým zatížením, avšak z důvodu menšího zisku energie ze slunečního záření v zimním období se tyto systémy kombinují s alternativními zdroji energie, např. s malou větrnou elektrárnou nebo elektrocentrálou → to vede ke zvýšení nákladů na instalaci celého systému
3. **Systémy s akumulací elektrické energie** – tento systém je opatřen solární baterií nebo solárními bateriemi pro uchovávání elektrické energie v době nedostatku slunečního záření, optimální vybíjení a nabíjení baterií je zajištěno elektronickým regulátorem opatřeným ještě střídačem DC/AC [9]



Obr. 10: Blokové schéma autonomního systému s akumulací elektrické energie [11]

Výhody tohoto systému:

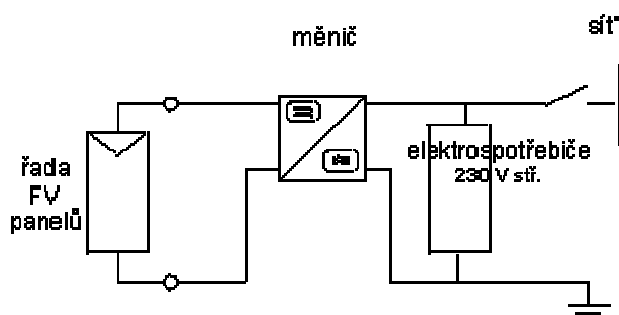
- uplatnění v místech bez veřejné elektrické rozvodné sítě

Nevýhody tohoto systému:

- dostupnost energie závisí na pravidelném a dostatečném dobíjení solárních baterií a s tím je úzce spjata i jejich údržba
- je nutné udržovat plochu solárního generátoru v čistotě
- je nutné používat vodiče s velkým průřezem, které zabraňují ztrátám elektrické energie na vedení

c) FV systémy spojené se sítí – grid-on systémy

Tyto systémy se především instalují tam, kde je zřízena hustá síť elektrických rozvodů. FV systémy jsou schopny dodávat energii do střídavé rozvodné elektrické sítě v případě přebytku energie a zároveň napájejí zařízení instalované v budově. V případě nedostatku sluneční energie systém odebírá z rozvodné sítě elektrický proud → není potřeba vyrobenou energii ukládat. Systém je řízen mikroprocesorem a je tedy plně automatický [10].



Obr. 11: Blokové schéma FV systému spojeného se sítí [11], [17]

Na **obr. 11** je uvedeno blokové schéma FV systému spojeného s elektrickou sítí. Jako zdroj elektrického napětí je použit solární generátor. Napětí je transformováno střídačem na $\sim 230\text{V}/50\text{Hz}$ a dodáváno do sítě nebo zařízení v budově. Střídače musí splňovat veškeré bezpečnostní a ochranné funkce (odolnost proti zkratu, přetížení atd.). Nejpoužívanější vlastnosti střídačů jsou jejich jmenovitá stejnosměrná vstupní napětí a to 12 V, 24 V nebo 48 V. Dosahují účinnosti až 90 %. Výhodou je, že elektrický spotřebič má vždy k dispozici elektrickou energii a může fungovat bez přítomnosti slunečního záření [9].

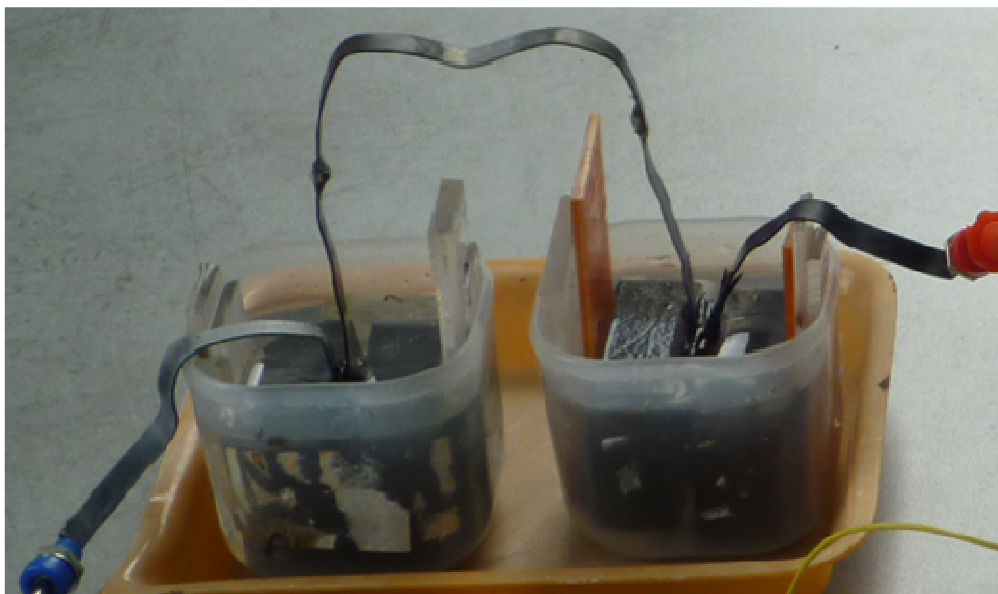
5 Praktická část

5.1 Popis měřicího pracoviště

Měřicí pracoviště je složeno z několika částí. První částí pracoviště je olověný akumulátor, dva moduly se zatěžovacími rezistory, tři bočníky pro měření proudu, dva solární panely, měřič intenzity osvětlení, multiplexer, digitální multimetr, switch karta a poslední částí je počítač, na kterém jsou nainstalovány řídicí programy. Nyní budou blíže popsány jednotlivé části měřicího pracoviště.

5.1.1 Olověný akumulátor

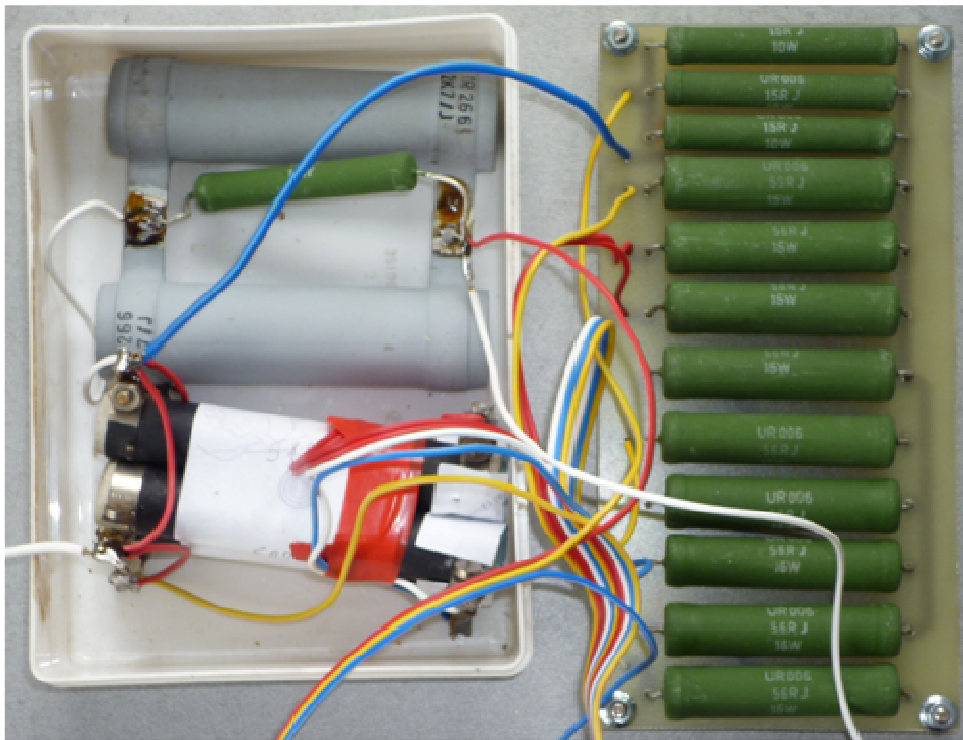
Jedná se o dva články olověného akumulátoru o rozměrech 3 x 2,5 cm, které jsou složeny ze dvou kladných a dvou záporných elektrod oddělených separátory pro zamezení vzniku zkratu. Napětí jednoho článku je 2,5 V tzn., že při sériovém spojení dvou takovýchto článků vznikne akumulátor (baterie) s elektrickým napětím přibližně 5 V. Články jsou ponořeny do roztoku kyseliny sírové H_2SO_4 a destilované vody. Tyto složky vytvářejí elektricky vodivý elektrolyt. Z **obr.12** je patrné, že kladné a záporné elektrody jsou společně se separátory mezi nimi k sobě přitlačeny plastovými díly, aby byla zajištěna správná funkce olověného akumulátoru. V této konstrukci akumulátoru jsou použity separátory od firmy Amer-Sil typ Low Silica content FC065 profile s porezitou 80 %, tloušťka separátoru je 0,792 mm, jeho stlačitelnost je 5,7 % v suchém a 5,2 % v mokřém stavu [1]. Baterie je opatřena vývody vyrobenými z olověných plechů na jejichž koncích jsou připájeny konektory pro snadné připojení akumulátoru do elektrického obvodu. Červený konektor značí kladný pól, modrý konektor označuje záporný pól baterie. Nádobky s články jsou ještě navíc umístěny v misce, aby při případném převrácení nemohlo dojít k rozlití kyseliny po pracovišti, což by nepochybně vedlo ke zničení vodičů spojujících měřicí přístroje.



Obr. 12: Olověný akumulátor (baterie)

5.1.2 Moduly se zatěžovacími rezistory

Jedná se o dva přípravky, které obsahují dvacet zatěžovacích rezistorů. Některé z nich jsou již na DPS spojeny paralelně, na **obr.13** vpravo, takže tvoří jeden rezistor. DPS byla navržena v návrhovém programu EAGLE 4.11. Hodnoty rezistorů byly voleny v začátku tvorby pracoviště podle možností laboratoře. Po získání prvních naměřených hodnot napětí a proudů, které byly vyhodnoceny do grafických závislostí, bylo možno z grafů odhadnout, které rezistory by mohly být vynechány nebo naopak, které rezistory s danou hodnotou elektrického odporu přidat. Tento postup se ukázal být velice výhodný, protože lze velmi snadno a rychle přidávat nebo odebírat rezistory potřebné pro rovnoměrné pokrytí „kolen“ při měření VA charakteristik. Jedná se tedy o otevřený systém umožňující modifikace zapojení podle aktuálně připojeného FV panelu a baterie.



Obr. 13: Vyobrazení dvou modulů se zatěžovacími rezistory

5.1.3 Bočníky pro měření proudu

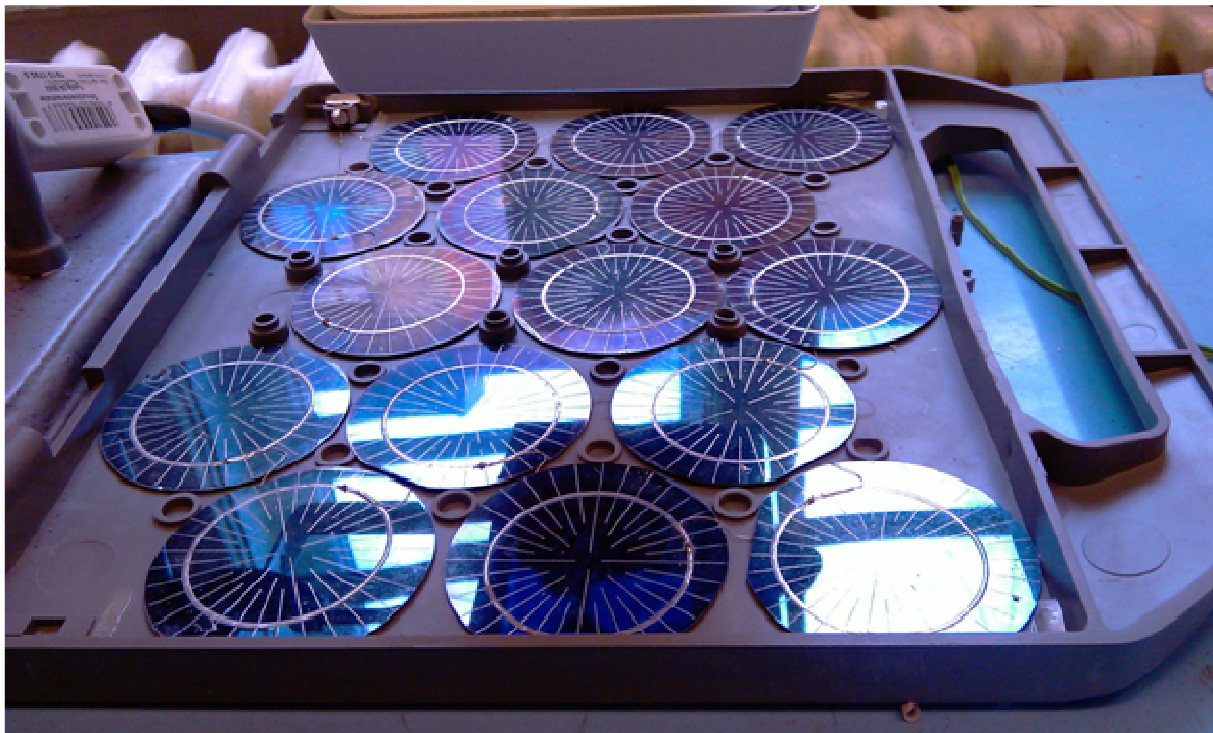
Pro měření proudu byly zvoleny namísto tří ampérmetrů tři totožné proudové bočníky, viz. **obr.14**. Maximální proudová zatížitelnost bočníků udávaná výrobcem je 10 A, úbytek napětí činí při tomto proudu 60 mV. Odpor bočníků byl změřen přístrojem METEX M-3850 a byla změřena hodnota elektrického odporu 1,1 Ω . Tato hodnota byla pro všechny tři bočníky stejná. Použití bočníků je výhodné v tom, že nemusíme shánět tři ampérmetry, které by jistě byly potřeba na jiné aplikace v laboratoři a navíc bočníky jsou nenáročné na místo. Hodnoty naměřené pomocí bočníků jsou za pomoci multiplexeru a karty switch posílány a měřeny pomocí digitálního multimetru. Pomocí bočníků se měří proud, který do obvodu dodává akumulátor, dále proud tekoucí ze solárního panelu a proud tekoucí přes rezistorovou zátěž.



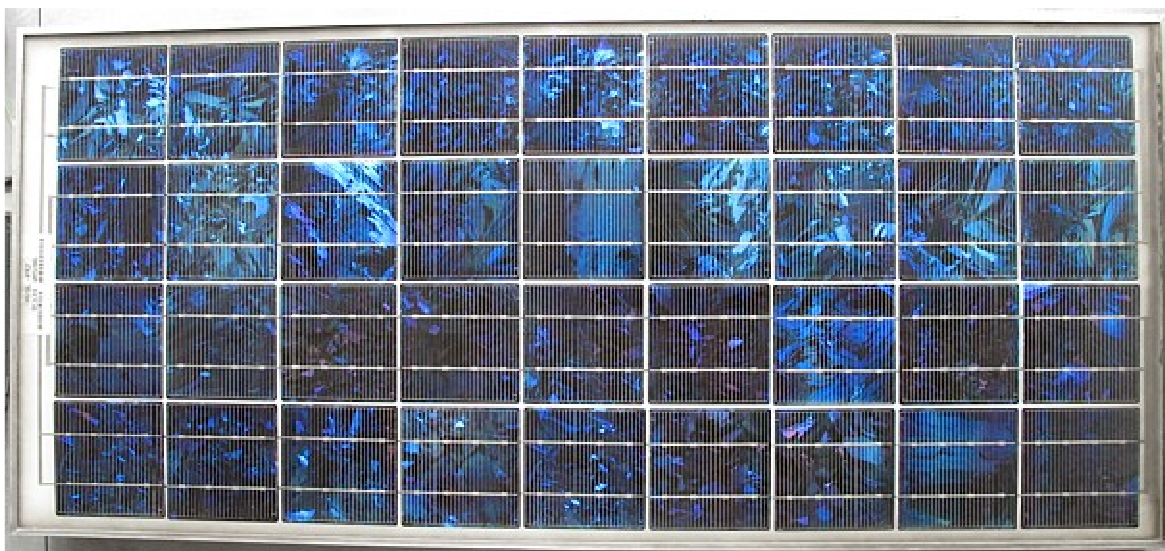
Obr. 14: Bočníky pro měření proudu

5.1.4 Solární panel

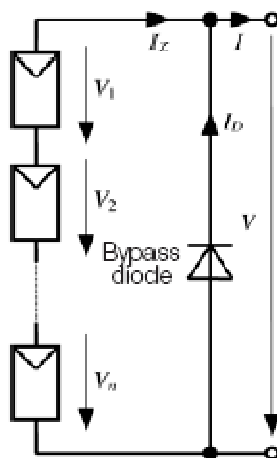
O solárním panelu lze obecně říci, že se jedná o zařízení, které umožňuje přímou přeměnu slunečního záření na energii elektrickou. Velikost napětí generovaného panelem se odvíjí od celkové plochy panelu, celkové ozařované plochy panelu, intenzity dopadajícího slunečního záření a sklonu panelu vůči dopadajícímu záření, kde ideální úhel naklonění panelu vůči dopadajícímu záření je 90° . Velikost napětí také závisí na materiálu, ze kterého je solární panel vyroben. Při experimentech byly používány dva typy solárních panelů. Prvním použitým typem je malý solární panel ruské výroby s patnácti kulatými solárními články, které jsou spojeny do série, viz. **obr.15**. V tomto případě je materiálem na výrobu článků polykrystalický křemík (modrá barva). Jsou přilepeny na plastový rám, který byl asi původně součástí otevíracího kufříku používaného patrně na nabíjení např. mobilních telefonů. Články mají průměr 6 cm a z toho lze snadno vypočítat celkovou plochu panelu a to $4,24 \cdot 10^{-2} m^2$. Panel je opatřen konektorem pro připojení k měřicímu pracovišti. Jeho odhadovaná účinnost se pohybuje kolem 1 až 2 %. Přesnější údaje o tomto panelu nebylo možno v důsledku jeho stáří zjistit. Tento panel byl použit pro měření VA charakteristik při různých režimech provozu. Druhým solárním panelem je panel s kovovým rámem s rozměry 110 x 45 cm s celkovou plochou článků $0,4 m^2$, viz. **obr.16**. Panel je rozdělen do dvou stringů (polí), kde každý string obsahuje 18 sériově spojených fotovoltaických článků a k nim je paralelně zapojena ochranná by-passová dioda. Její význam je popsán v kapitole 4.3. Z důvodu proudového omezení měřicích karet byl při měření použit pouze jeden string. **Obr.17** znázorňuje obecné zapojení jednoho stringu.



Obr. 15: Kufříkový solární panel ruské výroby



Obr. 16: Druhý testovaný solární panel

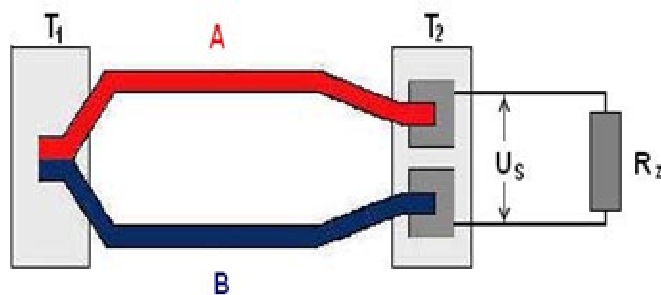


Obr. 17: Zapojení by-passové diody jednoho stringu, převzato z [8]

5.1.5 Měřič EMRSI

Zkratka EMRSI je tvořena počátečními písmeny anglických slov (Equipment for measuring of solar radiation intensity). Tento měřicí přístroj byl vyroben z nutnosti měření intenzity dopadajícího záření. Přístroj se skládá ze tří hlavních částí. Je to pyranometr SG420 (**obr.18**), napájecí zdroj a vlastní měřič osvětlení. Pyranometr je zařízení, které je v našem případě složeno z 12 termočlánků (princip termočlánku viz. **obr.19**) spojených do série. Termočlánky jsou umístěny pod skleněnou kopulí. Princip pyranometru je založen na rozdílu teplot vzniklým v důsledku dopadajícího slunečního záření na černých a bílých ploškách. Je jasné, že ideální bílé a černé barvy nelze dosáhnout, a proto na termočláncích vznikne napětí, které je po zesílení přímo závislé na intenzitě dopadajícího záření. Pyranometr je vybaven šroubovací vysoušecí vložkou, kterou lze měnit. Podle barvy lze určit stupeň navlhnutí, od modré (nenavlhnuté) až po bílou (navlhnuté). Po určité době je nutné vložku vyndat a vysušit. Termočlánek (**obr.19**) využívá principu termoelektrického jevu (Seebeckův jev). Jedná se o vodivé spojení dvou různě vodivých materiálů A a B. Materiály mohou být kovy nebo polovodiče vodivě spojeny na jednom konci s teplotou T_1 . Nespojené konce obou ramen termočlánku vykazují jinou teplotu, T_2 . V případě teplotního gradientu na konci o teplotě T_1 , se vytváří na vývodech termoelektrické, resp.

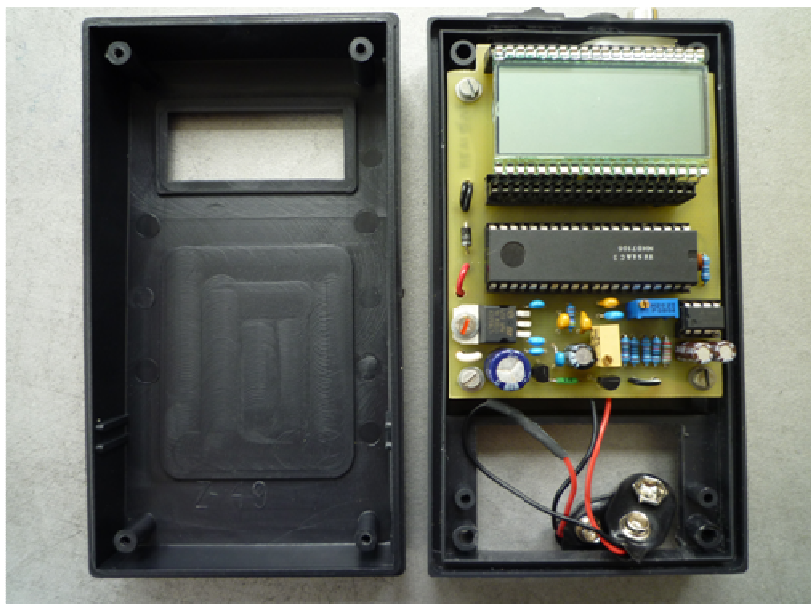
Seebeckovo napětí U_S [13]. EMRSI potřebuje napájení 18 Vss. Existují dva způsoby napájení. Buď síťovým 18V adaptérem, nebo dvěma 9V bateriemi pro měření v terénu.



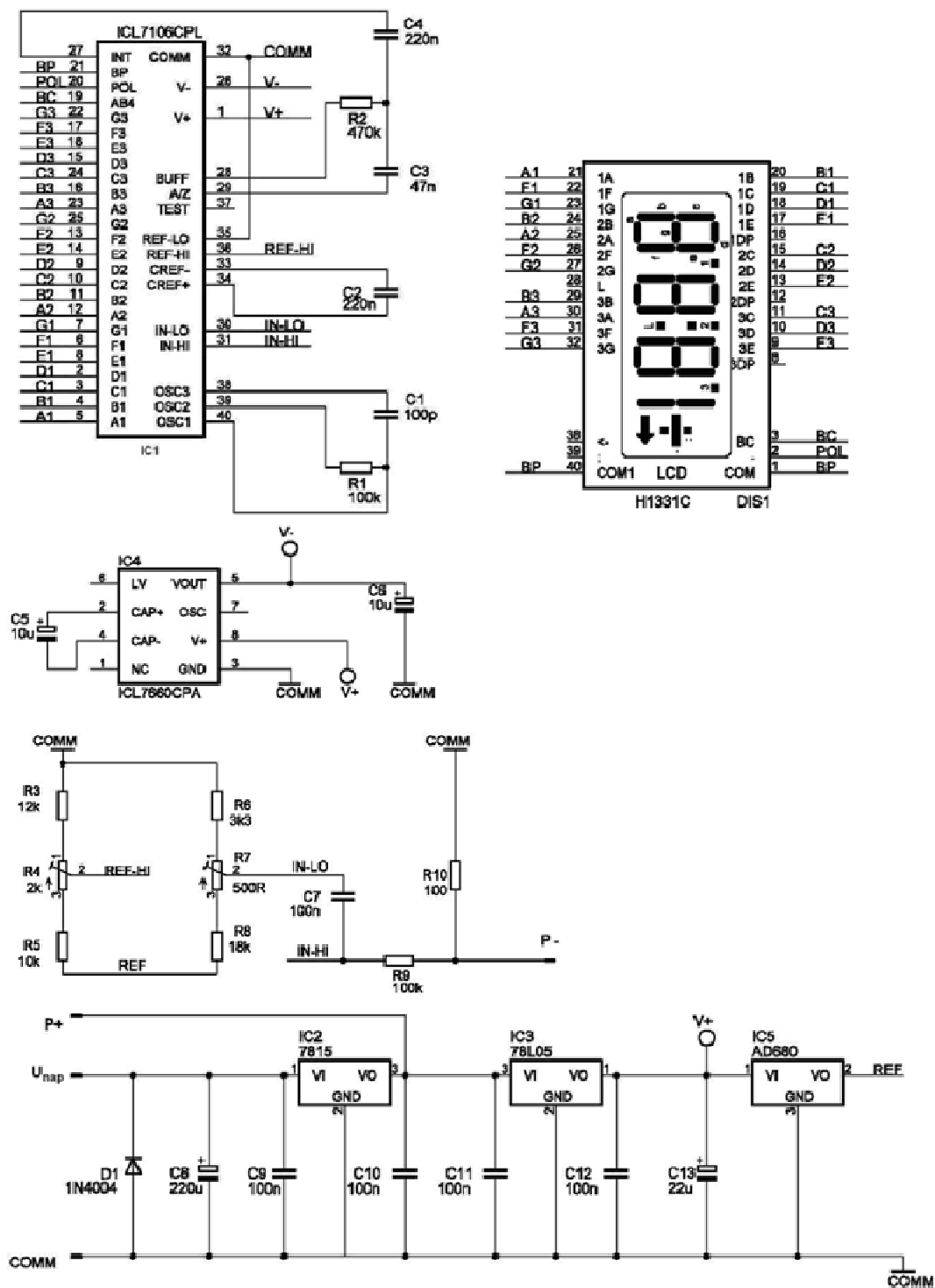
Obr. 18: Pyranometr (vlevo) [14],

Obr. 19: Termočlánek (vpravo), převzato z [13]

EMRSI viz. **obr.20**, je umístěn do plastové krabičky s výřezem na displej. Zařízení je opatřeno vypínačem a konektorem pro připojení pyranometru.

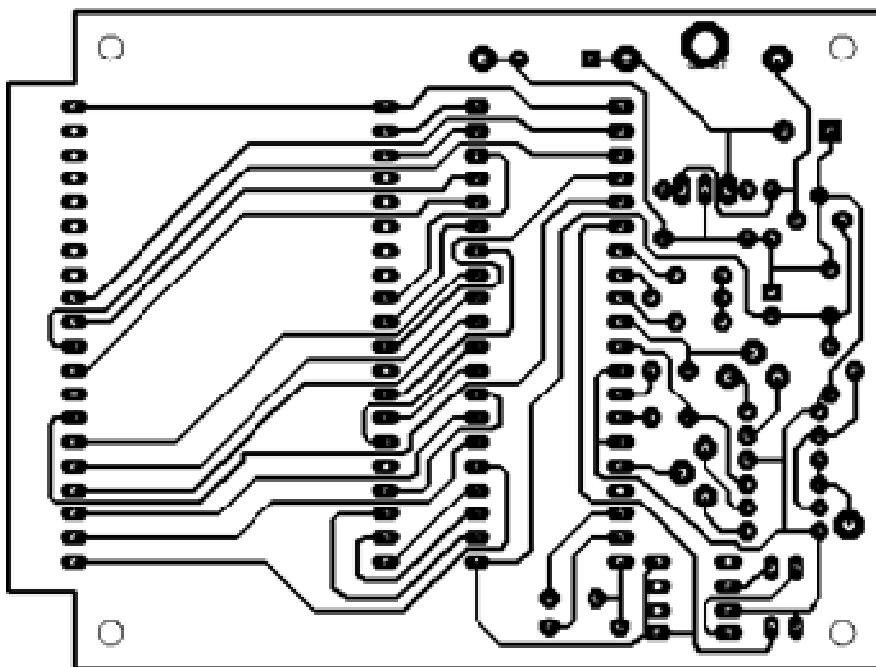


Obr. 20: Měřič EMRSI

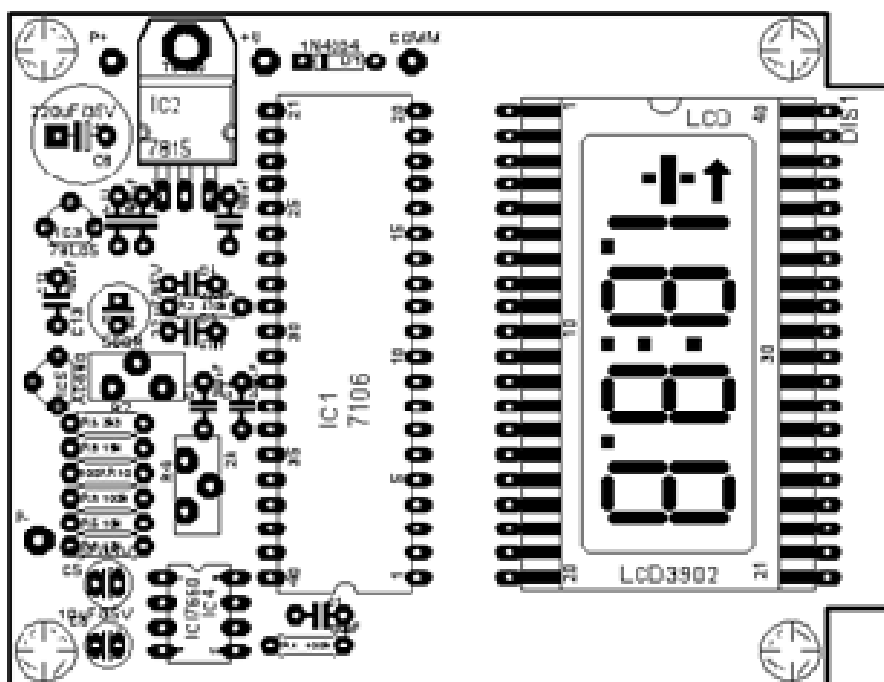


Obr. 21: Kompletní zapojení EMRSI [13]

Výhodou tohoto přístroje je, že zobrazovaný údaj na displeji přímo udává hodnotu intenzity osvětlení ve W/m^2 . Měřicí rozsah je od 0 do $1200 W/m^2$, na displeji se zobrazí údaj buď „000“ nebo „1200“. Tomuto rozsahu odpovídá proudový výstup z pyranometru o hodnotě proudu 4 až 20 mA. Přesnost EMRSI je tedy $1 W/m^2$. Návrh tohoto zařízení byl vytvořen v návrhovém programu EAGLE 4.11. Celkové schéma zapojení měřiče EMRSI je zobrazeno na **obr.21**. DPS je vyrobena z materiálu FR4 (kombinace epoxidové pryskyřice + skelná tkanina). Deska je zhotovena jednostranně. Cesty jsou z důvodu minimalizace navlhání a zvýšení mechanické ochrany natřeny pájitelným lakem vytvořeným z technického lihu a kalafuny.



Obr. 22: Pohled na desku měřiče EMRSI ze strany spojů



Obr. 23: Osazovací plán měřiče EMRSI

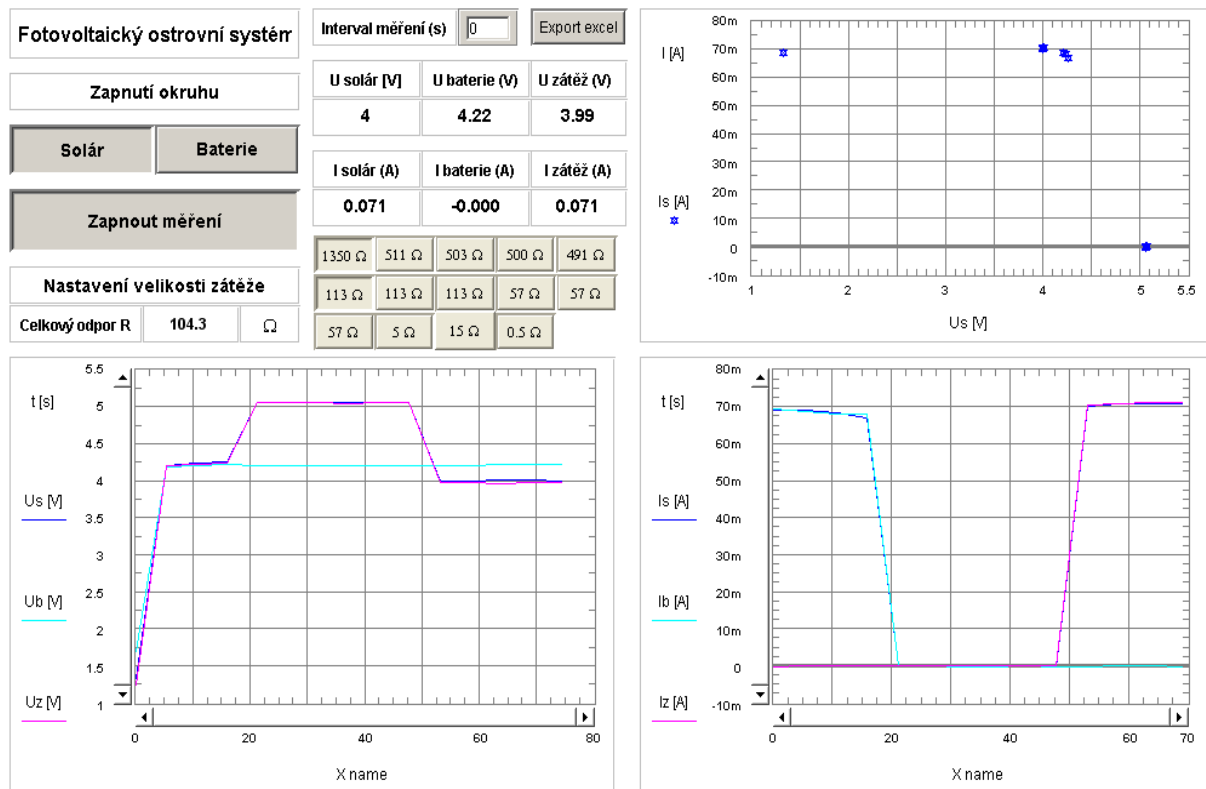
5.1.6 Digitální multimetr Agilent 34405A, multiplexer Agilent 4421A a switch Agilent 4437A

Všechny tři měřicí přístroje řídí počítač. Výstup multiplexeru je spojen s digitálním multimetrem. Multiplexer je zařízení, které disponuje několika vstupy a jedním výstupem a vždy přepíná data ze vstupu na výstup. V našem případě tedy přepíná na výstup hodnoty napětí a proudů solárního panelu, baterie a zátěže. Tyto hodnoty jsou měřeny digitálním multimetrem a jsou posílány do počítače. Karta switch je zde proto, aby připojovala nebo odpojovala daný okruh, na kterém má být prováděno měření, tzn. okruh solárního panelu, baterie a zátěže [9].

5.1.7 PC s měřicími programy

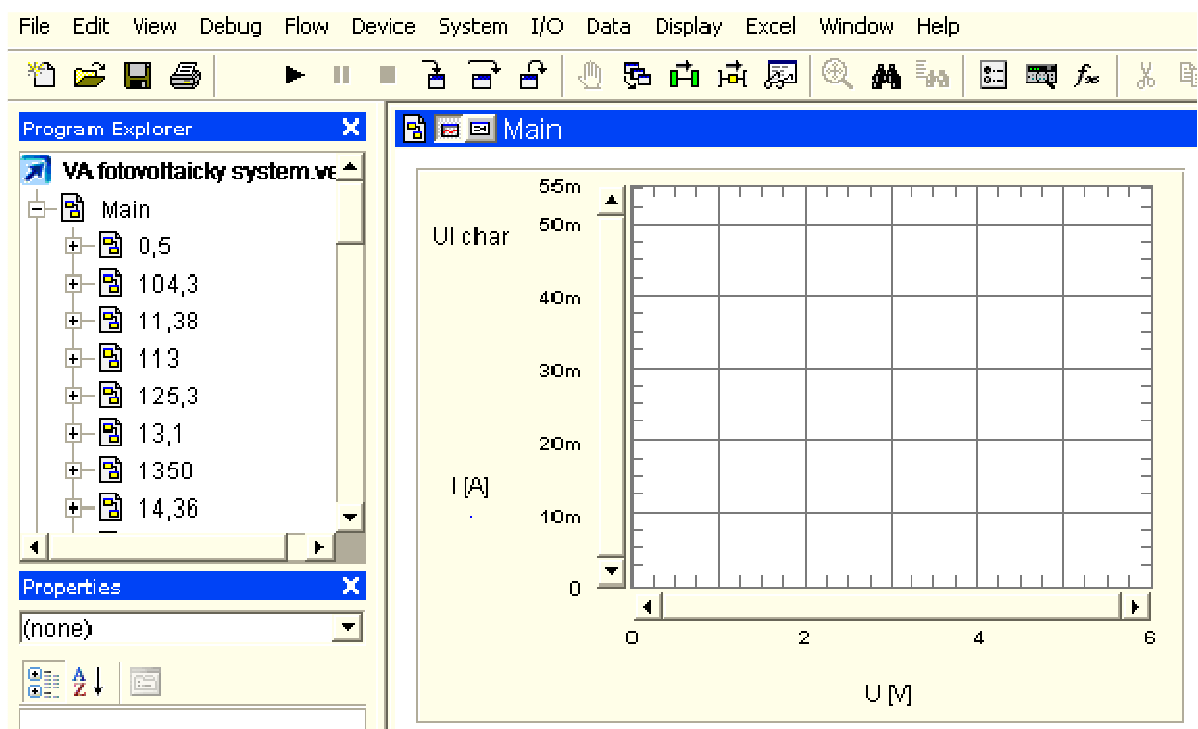
Programy jsou vytvořeny v grafickém prostředí VEEPro8.0. Jedná se o grafický programovací software vyznačující se relativně snadným programováním, snižováním počtu řádků programu a přehlednějšími obrazovkami při vytváření programů. Jedná se o programovací jazyk s vysokou úrovní, který používá grafické zobrazení podobné vývojovému diagramu [15].

Prvním programem je **fotovoltaický system.vee**. V uživatelském okně, viz. **obr.24**, může obsluha zvolit, který okruh má být připojen, lze nastavit velikost zátěže pomocí tlačítek s hodnotami odporů a také lze nastavit interval mezi měřeními. Po stisku například dvou tlačítek s odpory je zobrazen výsledný odpor zátěže → paralelní spojování rezistorů. Jedná se o informaci sloužící k orientaci obsluhy při měření. Program pracuje v nekonečných cyklech, ve kterých se testuje jestli je nebo není daná funkce (např. zmáčknuté tlačítko Export excel) aktivována. Program je strukturován do objektů, tzv. „buněk“, kde jsou napsány instrukce kudy se při dané hodnotě na vstupu má ubírat program na výstupu. Toto si lze představit jako „pokud není splněna podmínka, tak udělej něco...“. Naměřené hodnoty tímto programem lze ukládat do excelu pomocí tlačítka Export excel. Pokud chceme naměřená data ukládat, musíme si před začátkem měření nejprve vytvořit soubor v Excelu na daném místě v počítači. Cestu k tomuto souboru musíme zadat do objektu Set xls File Spec v programovém editoru. Název souboru musíme zadat do objektu Set xls File Name. Pokud máme vše nastaveno, spustíme program a klikneme na „Zapnout měření“. Pokud ale nechceme naměřená data ukládat, nemusíme tvořit soubor v Excelu a lze pouze pozorovat probíhající měření. V jednom cyklu se změří napětí a proudy baterie, zátěže a solárního panelu. V uživatelském okně najdeme tři pole s grafy. V prvním grafu jsou, na **obr.24** vpravo nahoře, zobrazovány VA charakteristiky baterie, solárního panelu a zátěže. Ve druhém grafu vlevo dole, se při měření vykreslují časové průběhy napětí na solárním panelu, zátěži a baterii. Posledním grafem na **obr.24** vpravo dole je zobrazován průběh časových závislostí proudů protékajících opět solárním panelem, baterií a zátěží.

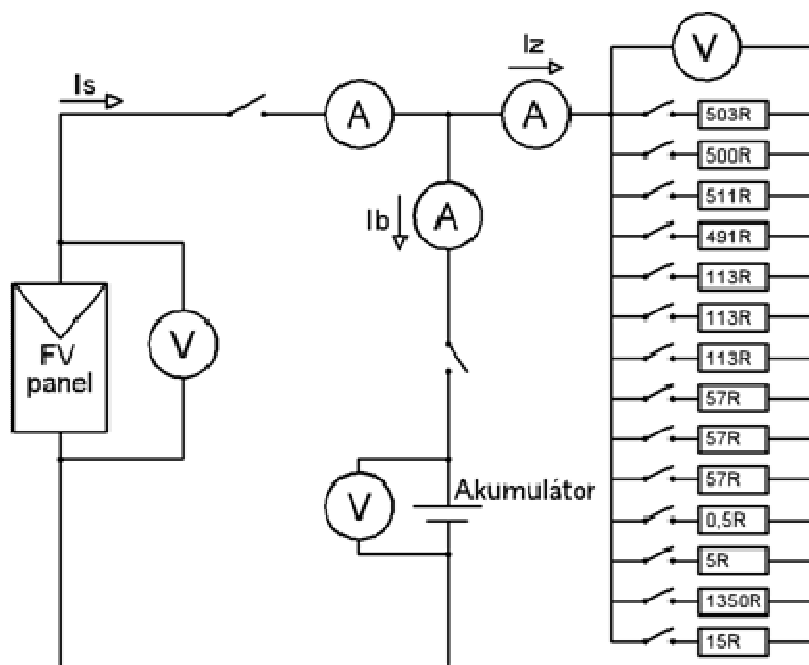


Obr. 24: Uživatelské okno programu fotovoltaicky system.vee

Druhým programem je program **VA fotovoltaicky system.vee**. Uživatelské okno tohoto programu je tvořeno pouze jedním polem, ve kterém je umístěn graf, viz. **obr.25**. Tento graf zobrazuje VA charakteristiku solárního panelu, i když jen jako informativní záležitost a ani tento graf by v uživatelském okně nemusel být. Jednoduchost uživatelského okna je dána tím, že toto měření je plně automatizováno. Při tomto měření se používá pouze dvou modulů se zatěžovacími rezistory a aktuálně připojeného fotovoltaického panelu. Kombinace rezistorů jsou voleny automaticky měřícím programem, proto, aby byla VA charakteristika změřena co nejrychleji a oteplování panelu, popřípadě změna intenzity dopadajícího slunečního záření ovlivnily měření jen v minimální míře. Po spuštění měření se mění kombinace rezistorů v posloupnosti od nejmenší hodnoty odporu, v tomto případě $0,5\ \Omega$, po největší hodnotu odporu $1350\ \Omega$. Po změření VA charakteristiky je okamžitě otevřen soubor ve formátu xls nadefinovaný postupem viz. výše. Do něj jsou zapsány naměřené hodnoty proudu a napětí solárního panelu a následně se zobrazí VA charakteristika tohoto panelu.

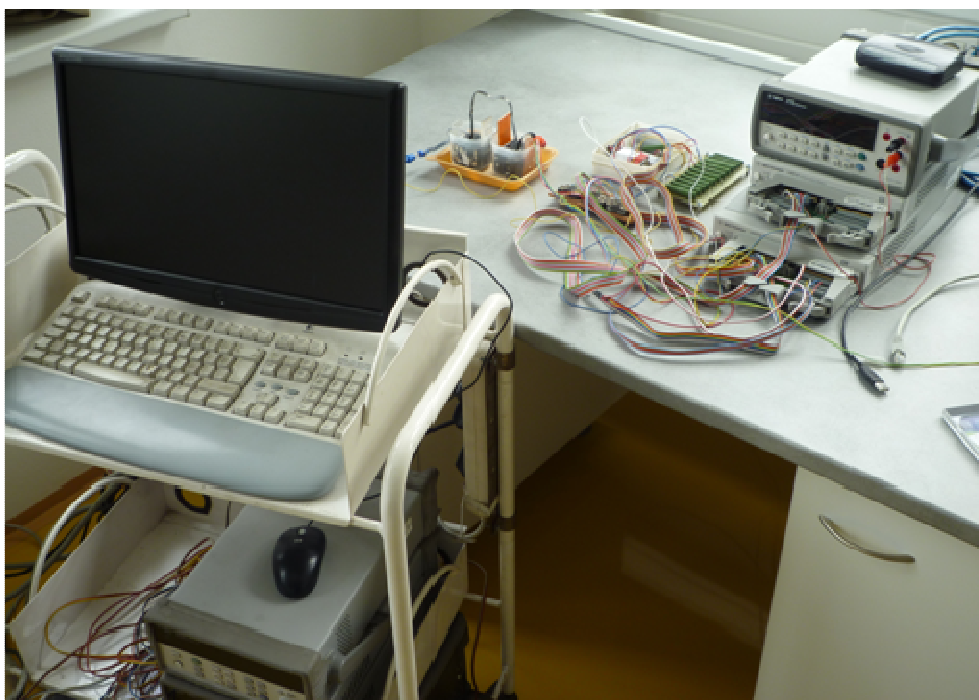


Obr. 25: Uživatelské okno programu VA fotovoltaicky system.vee

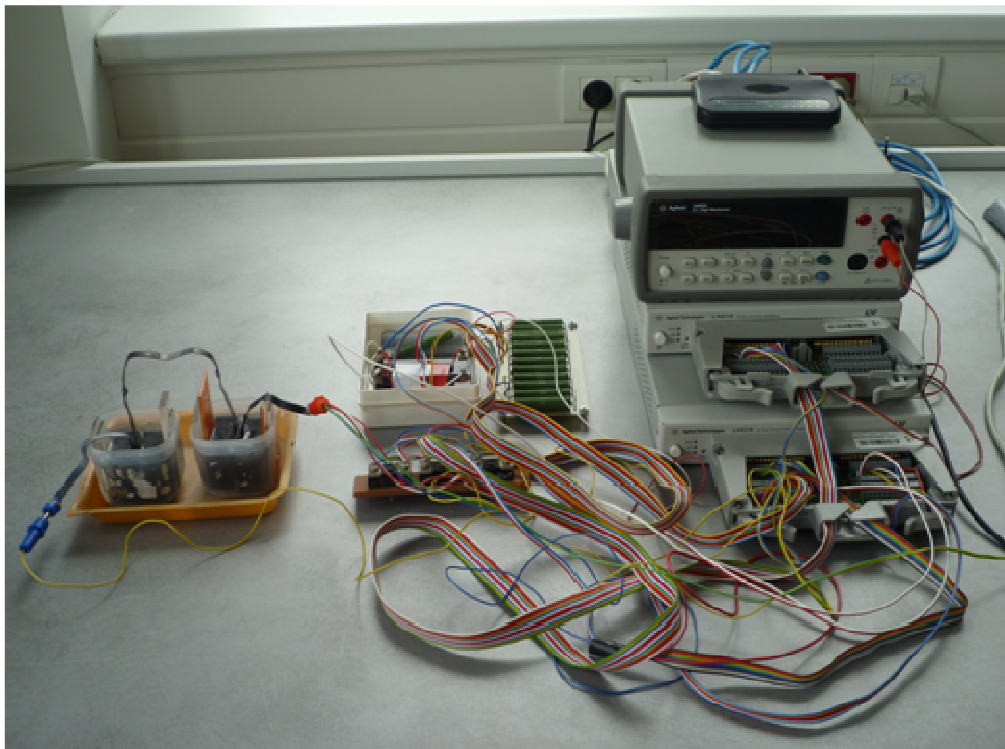


Obr. 26: Zjednodušené schéma měřicího pracoviště

Obr.26 zobrazuje zjednodušené schéma měřicího pracoviště, kde písmenem V se označují voltmetry, znak A značí bočníky pro měření proudu. Dále vidíme zakreslený akumulátor a zatěžovací rezistory s vypínači. Vypínače zastupují kartu switch, ke které jsou tyto rezistory připojeny.



Obr. 27: Celkový pohled na měřicí pracoviště

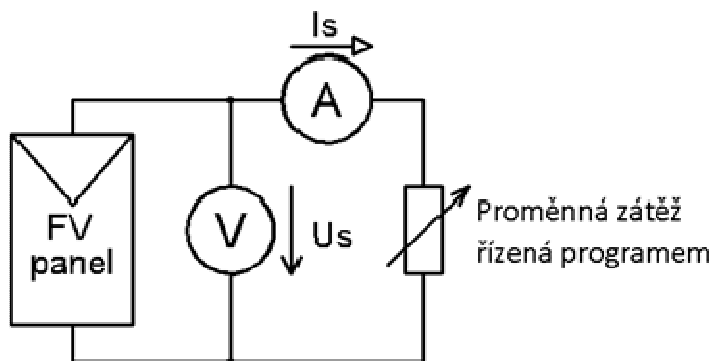


Obr. 28: Bližší pohled na měřicí pracoviště

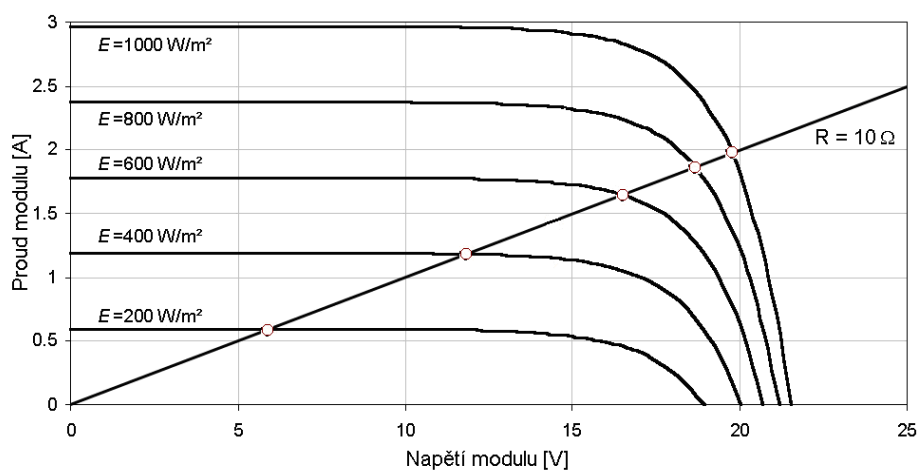
5.2 Popis experimentů a výsledky měření

5.2.1 Experiment č.1

Prvním experimentem bylo měření VA charakteristik dvou neznámých fotovoltaických panelů při různé intenzitě slunečního záření za pomoci programu **VA fotovoltaicky system.vee**, jehož popis je uveden výše. Schéma zapojení tohoto měření je znázorněno na **obr.29**. Intenzita osvětlení byla měřena pomocí pyranometru a měřiče EMRSI, viz. výše. U panelu z **obr.16** byla volena intenzita osvětlení relativně velmi malá a to 230 W/m^2 z důvodu proudového omezení měřících karet. Na následujících grafických závislostech jsou zobrazeny VA charakteristiky panelu, viz. **obr.16**. Grafické znázornění VA charakteristik se zatěžovacím odporem pro různé intenzity dopadajícího záření na standardní fotovoltaický panel je uvedeno na **obr.30**.

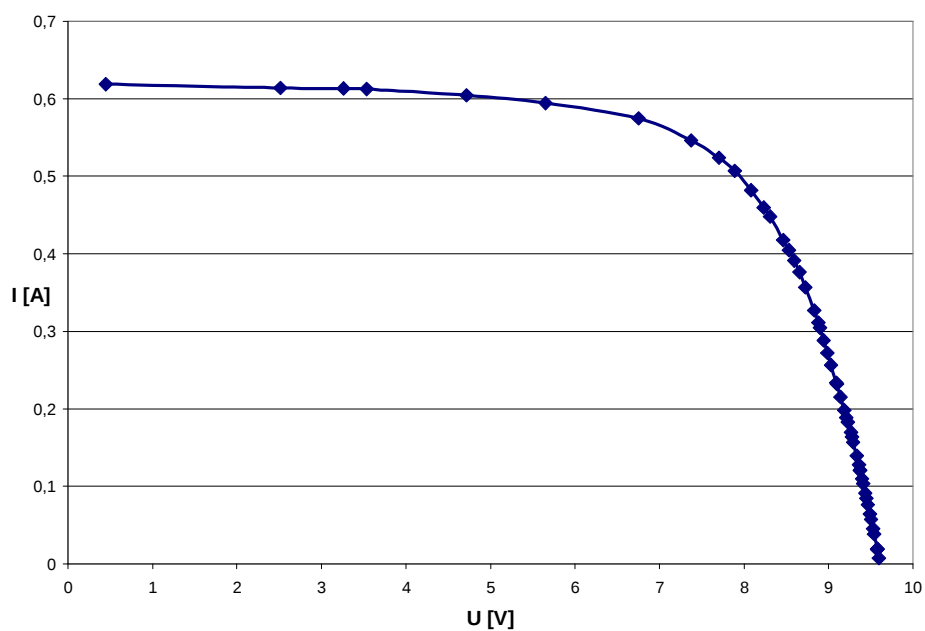


Obr. 29: Schéma zapojení pracoviště pro měření VA charakteristik

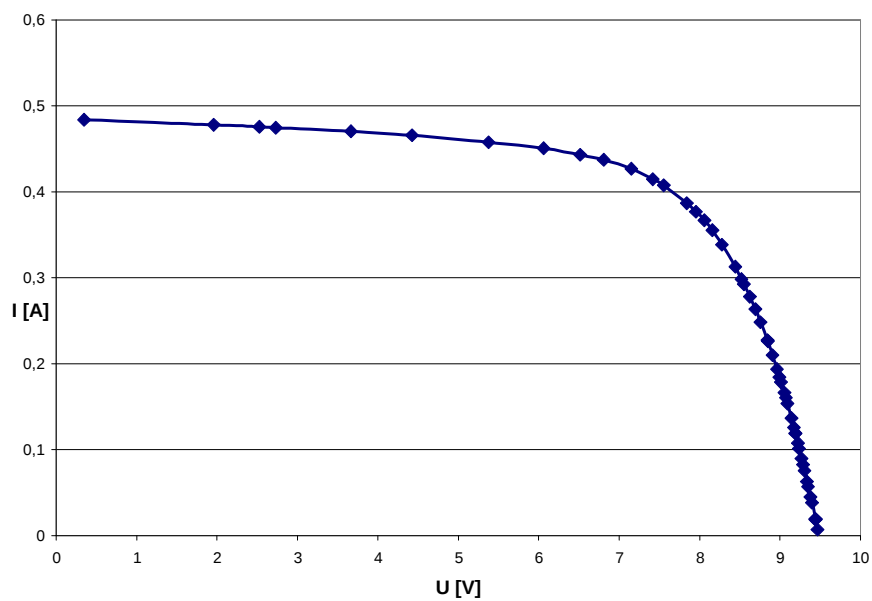


Obr. 30: VA charakteristiky standardního panelu [8]

Toto měření je omezeno maximálním přípustným proudem 1 A, který jsou schopny změřit měřicí karty. Tato hodnota se při měření nesmí překročit. Po změření charakteristiky uvedené na **obr. 31** jsme se společně s vedoucím dohodli, že i když naměřený proud 620 mA nedosahuje maximální přípustné hodnoty, nebudeme zvyšovat intenzitu osvětlení a tím pádem riskovat poškození měřicích karet. Další měření bylo prováděno s nižší intenzitou osvětlení, viz. **obr. 32**.

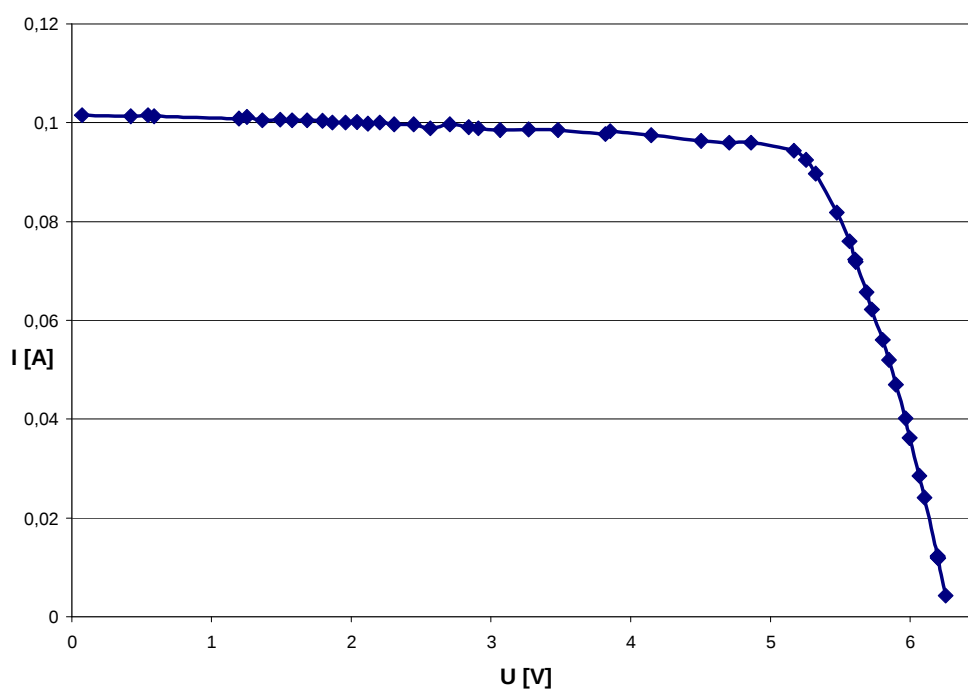


Obr. 31: VA charakteristika panelu, obr.16, při intenzitě dopadajícího záření 230 W/m^2 , maximální proud 620 mA

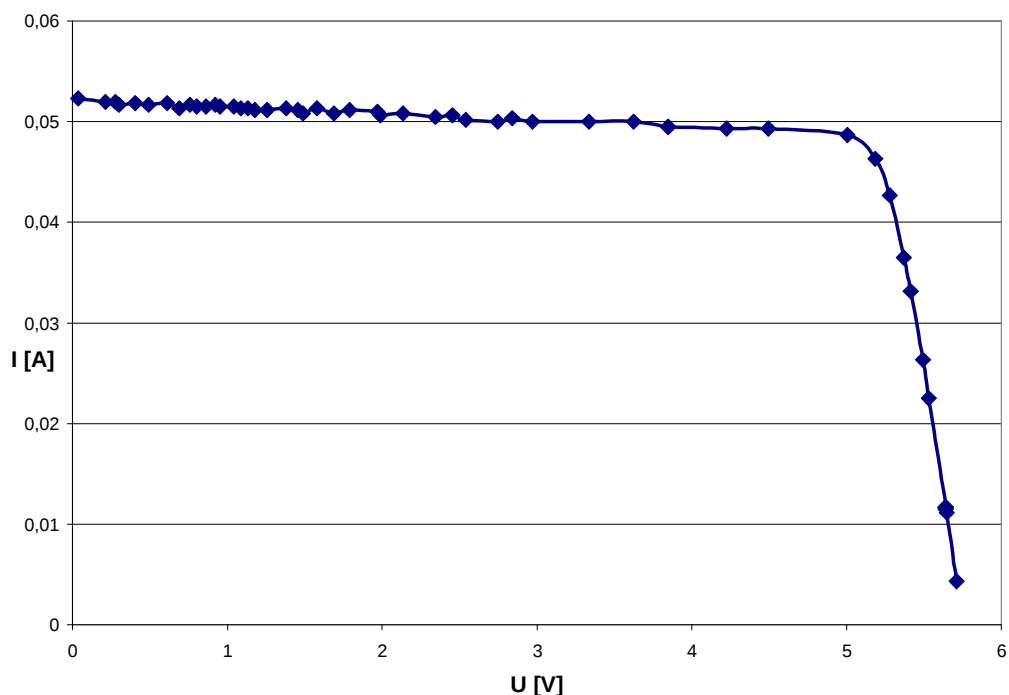


Obr. 32: VA charakteristika panelu, obr.16, při intenzitě dopadajícího záření 180 W/m^2 , maximální proud 484 mA

Druhým panelem u kterého byla změřena VA charakteristika pro různé hodnoty intenzity osvitu byl malý kufříkový solární panel ruské výroby. Při měření VA charakteristiky na tomto panelu bylo dosaženo maximální intenzity dopadajícího slunečního záření 400 W/m^2 při celkovém osvitu všech článků panelu. Zde byl opět pro měření intenzity použit pyranometr a měřič EMRSI.



Obr. 33: VA charakteristika malého kufříkového solárního panelu při intenzitě dopadajícího slunečního záření 400 W/m^2 , maximální proud 102mA



Obr. 34: VA charakteristika malého kufříkového solárního panelu při intenzitě dopadajícího slunečního záření $205\text{ W} / \text{m}^2$, maximální proud $52,3\text{ mA}$

5.2.2 Experiment č. 2

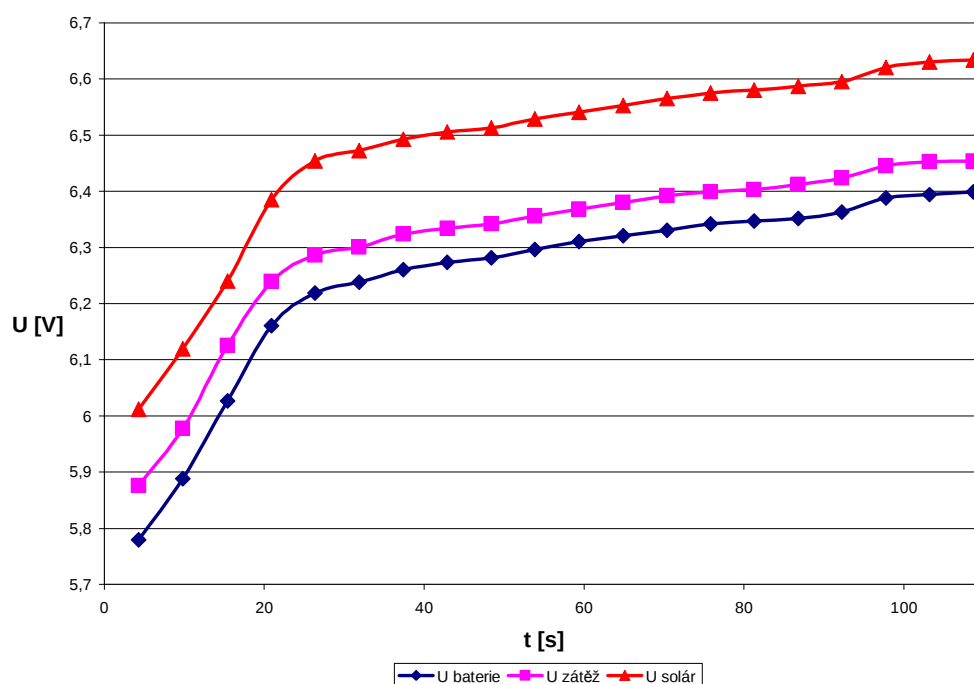
V tomto experimentu byl testován fotovoltaický systém při různých režimech provozu, kdy akumulátor byl nabitý, polonabitý a zcela vybitý až sulfatovaný. Měření bylo prováděno tak, že byl spuštěn měřicí program **fotovoltaicky system.vee** a následně byla nastavena požadovaná velikost zátěže. Během asi tří kroků byla nastavena maximální, poté minimální a nakonec byla odhadnuta střední hodnota zátěže pro dané měření. U jednotlivých stavů akumulátoru byly pozorovány časové průběhy napětí a proudů. Dále byla manuálně volena velikost zatěžovacího odporu, aby se akumulátor nabíjel, vybíjel nebo byl v režimu stání. „Stání“ neboli stagnace akumulátoru je stav, kdy je velikost zátěže stanovena tak, aby se akumulátor ani nenabíjel ani nevybíjel. Tzn., že veškerý proud vyrobený FV panelem protéká zátěží. Tento postup měření se prováděl u všech stavů akumulátoru. U nabité baterie byl použit velký panel, viz. **obr.16**, u polonabité a vybité baterie byl použit pro měření malý kufříkový solární panel. Zapojení určené pro měření na fotovoltaickém panelu při různých režimech provozu je shodné s celkovým

zjednodušeným schématem měřicího pracoviště, viz. **obr.26**. Výsledné grafické závislosti získané z tohoto experimentu jsou uvedeny níže.

1. Baterie nabitá

a) nabíjení - velikost zátěže $14,78\Omega$

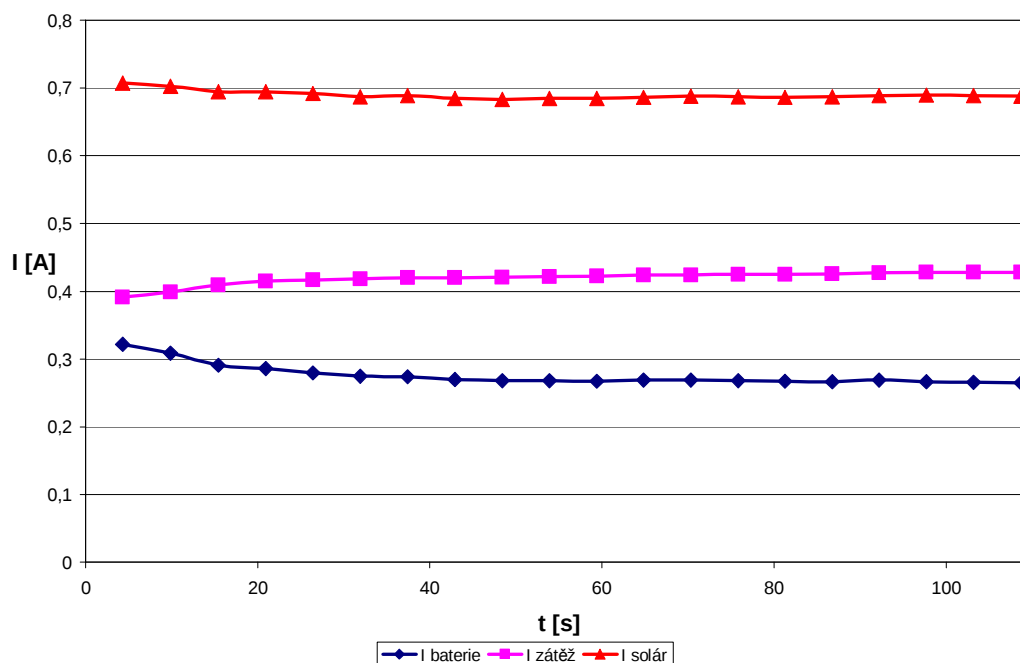
Při tomto měření se ukázalo, že akumulátor výrazně ovlivňuje průběhy napětí na solárním panelu a na zátěži, což znamená, že pokud roste napětí na baterii, musí růst i napětí na FV panelu a na zátěži. Zjednodušeně lze říci, že fotovoltaický panel, baterie a zátěž jsou spojeny paralelně, ale nebereme v potaz ampérmetry tj. bočníky, odpory kontaktů karty switch a odpor kabeláže. Tyto parazitní odpory se projeví na výsledných časových průbězích napětí solárního panelu, baterie a zátěže. Z **obr. 35** je vidět, že napětí fotovoltaického panelu, baterie a zátěže se liší právě v důsledku parazitních odporů.



Obr. 35: Časová závislost průběhu napětí nabité baterie při nabíjení

O časové závislosti proudu lze říci, že největší proud teče přes fotovoltaický panel a tento proud je v podstatě součtem proudu baterie a proudu procházejícího zátěží. Lze tedy konstatovat,

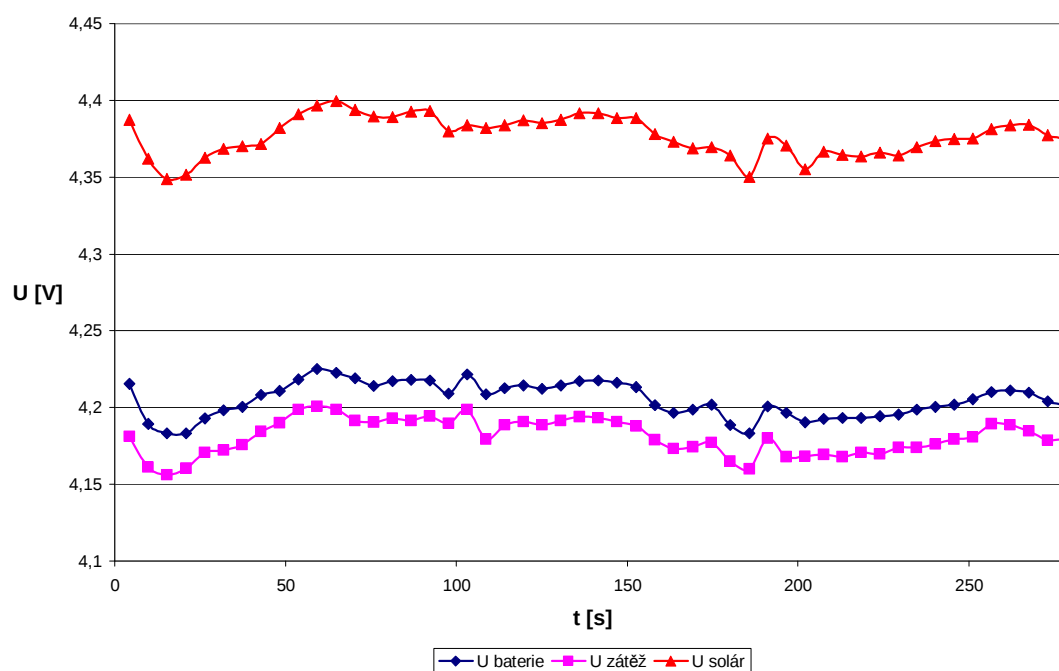
že se proud fotovoltaického panelu dělí mezi baterii a zátěž a tomu odpovídají i jednotlivá napětí. Tuto situaci ilustruje **obr.36**.



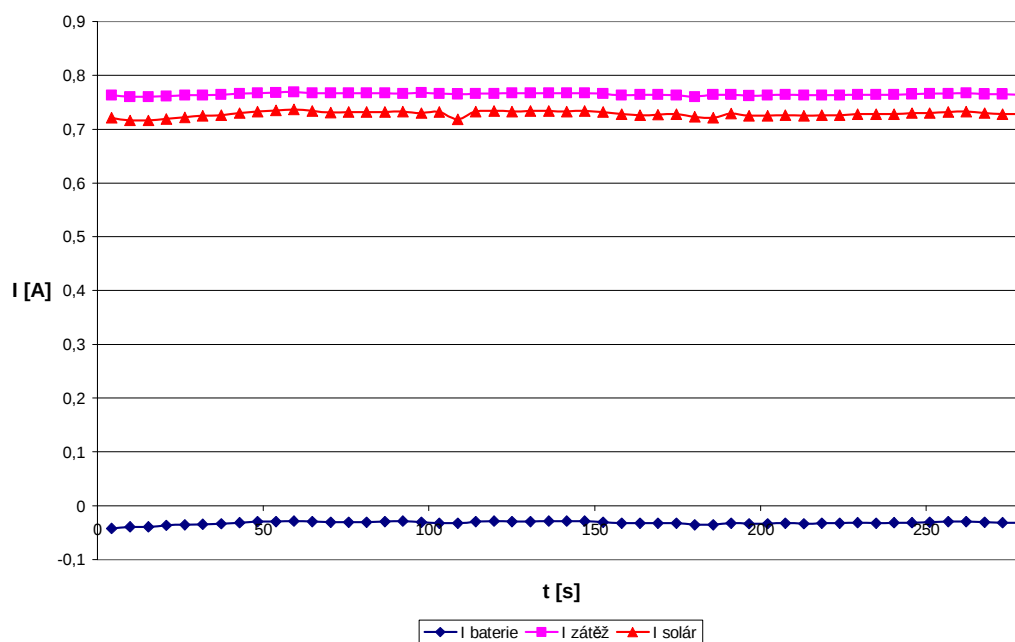
Obr. 36: Časová závislost průběhu proudu nabité baterie při nabíjení

b) stagnace – velikost zátěže $5,5\Omega$

Z časové závislosti průběhu napětí při stagnaci akumulátoru, viz. **obr.37** je vidět, že napětí na FV panelu, akumulátoru a zátěži se mění řádově o setiny voltu. Na tomto grafu je zvláštní skutečnost, že napětí baterie (modrá křivka) je vyšší než napětí na zátěži (růžová křivka). Toto by mohlo být způsobeno proudem procházejícím baterií. Při tomto měření nebylo dosaženo úplného stání, ale docházelo k mírnému vybíjení akumulátoru. To má za následek, že v časové závislosti průběhu proudu při stagnaci akumulátoru, viz. **obr.38**, nejsou průběhy proudu FV panelu a zátěže (červená a růžová křivka) totožné. Dochází k tomu, že do zátěže teče proud jak z FV panelu, tak i malý proud z baterie. Dalším faktorem ovlivňujícím měření může být i změna intenzity dopadajícího záření, kterou nebylo možno v průběhu měření vždy zachovat.



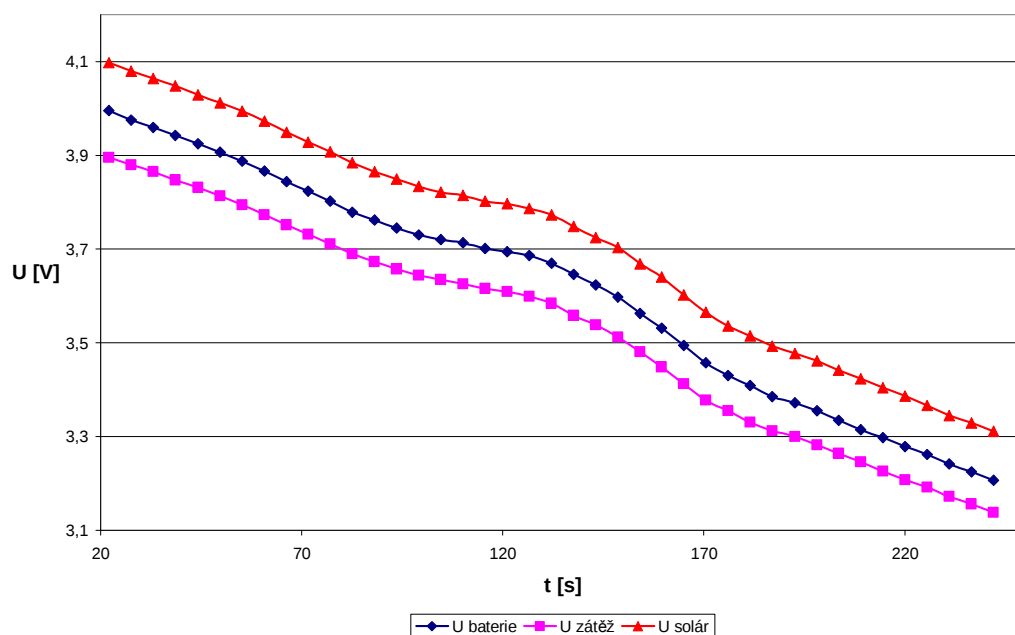
Obr. 37: Časová závislost průběhu napětí nabité baterie při stání



Obr. 38: Časová závislost průběhu proudu nabité baterie při stání

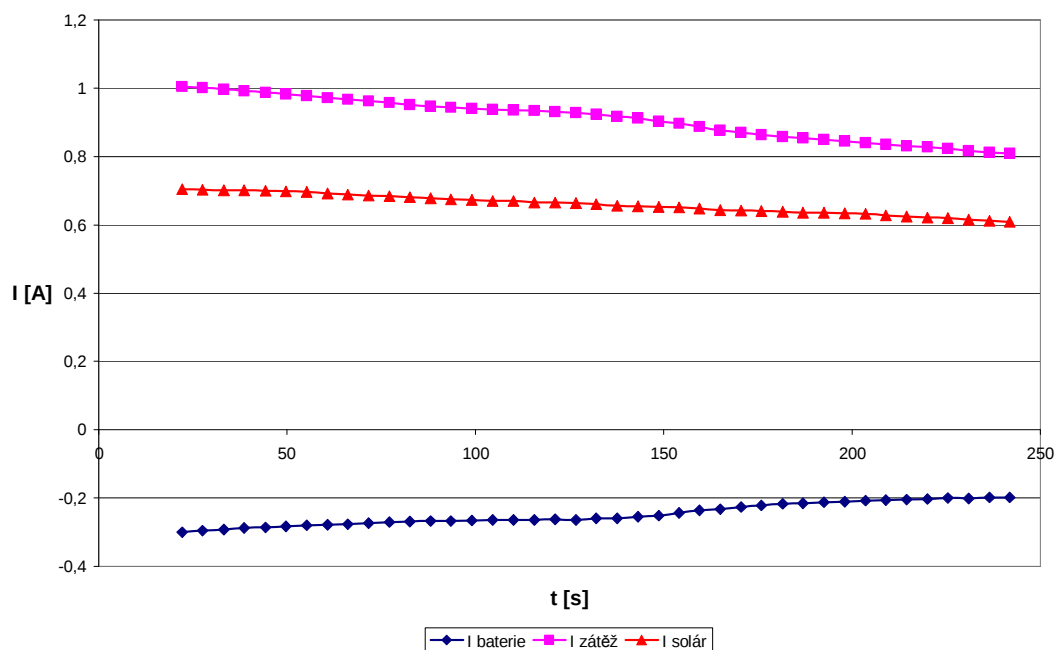
c) vybíjení – velikost zátěže $3,47\Omega$

Při tomto měření dochází ve výsledných charakteristikách, viz. **obr.39**, k poklesu napětí, který je způsoben vybíjením akumulátoru. Tím, že klesá napětí na akumulátoru dochází i k poklesu napětí jak na FV panelu, tak na zátěži. Je to v podstatě přesně opačný proces než při nabíjení.



Obr. 39: Časová závislost průběhu napětí nabité baterie při vybíjení

Co se týče časového průběhu proudu při vybíjení, viz. **obr.40**, je patrné, že maximální proud teče do zátěže. Tento proud je opět dán součtem proudu, který dodává baterie a proudu dodávaným FV panelem.

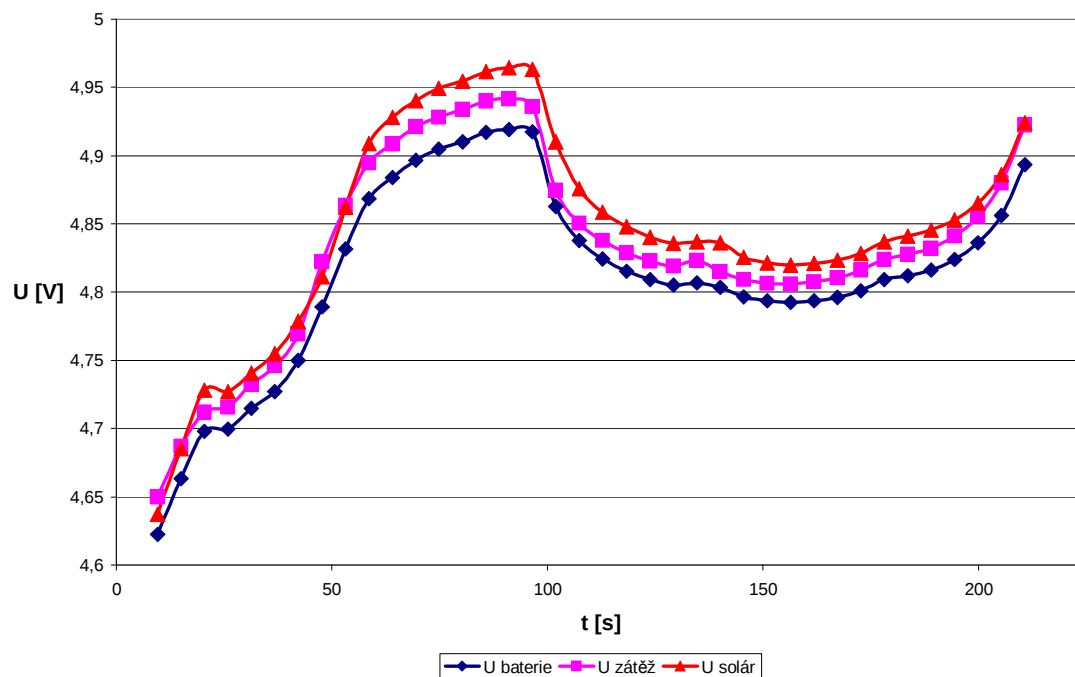


Obr. 40: Časová závislost průběhu proudu nabité baterie při vybíjení

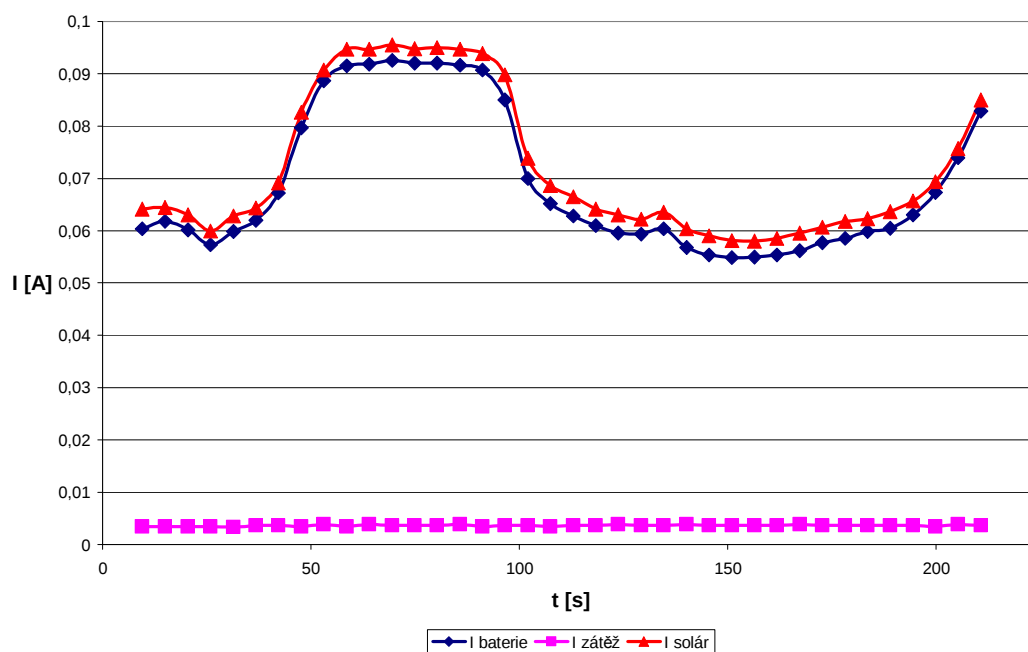
2. Baterie polonabitá

a) nabíjení – velikost zátěže 1350Ω

V průběhu měření nebylo možno zajistit konstantní intenzitu osvitů a tudíž dochází ke změnám proudu FV panelu, viz. **obr.42** (červená křivka). Také to může být způsobeno malým výkonem FV panelu a velkou hodnotou zatěžovacího odporu. Měření bylo nastaveno tak, aby téměř všechna proud tekla do akumulátoru a skoro žádný proud do zátěže. Z grafu na **obr.42** se může zdát, že proud procházející zátěží je neměnný, i když se napětí na zátěži, viz. **obr.41**, v prvních 100 s měření mění přibližně o více než 10%. Ale ve skutečnosti proud procházející zátěží kopíruje průběhy proudu FV panelu a baterie, ale z důvodu hrubého nastavení měřítka osy y pro zobrazení všech průběhů proudů, nelze tyto změny zaznamenat a změny tedy nelze vidět. Dále křivka proudu akumulátoru kopíruje křivku proudu FV panelu a to je opět způsobeno mnohem vyšším odporem zátěže oproti odporu akumulátoru.



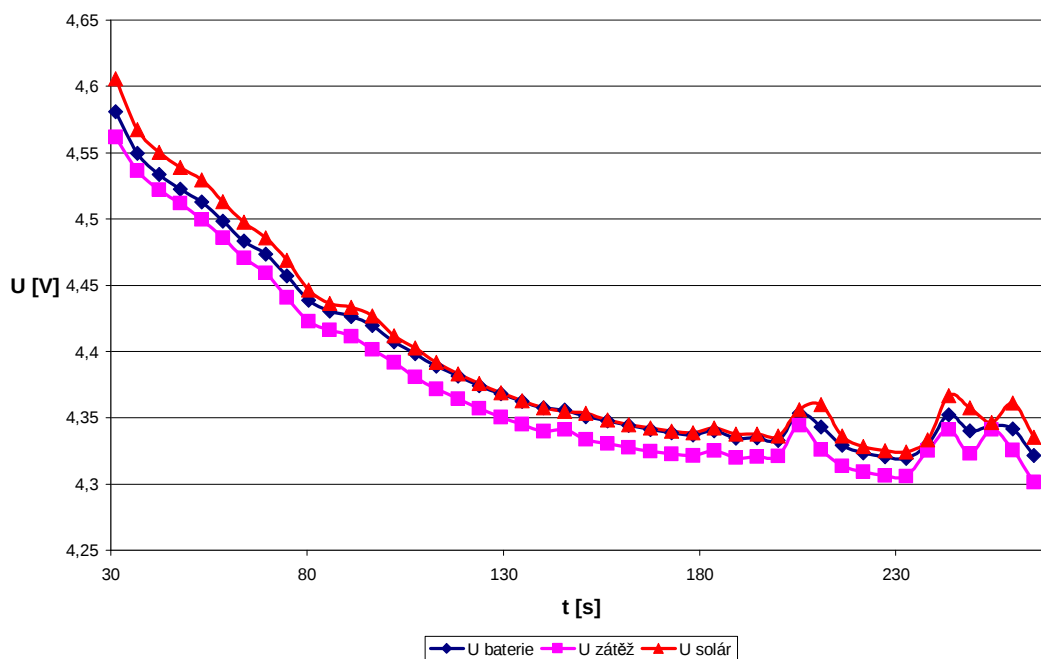
Obr. 41: Časová závislost průběhu napětí polonabité baterie při procesu nabíjení



Obr. 42: Časová závislost průběhu proudu polonabité baterie při procesu nabíjení

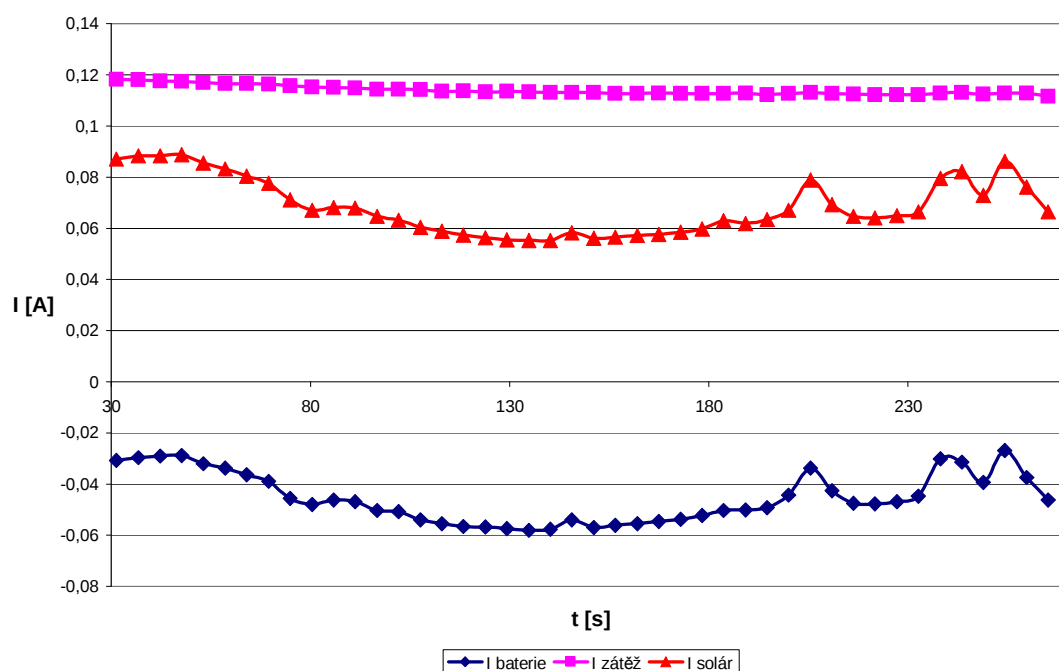
b) vybíjení – velikost zátěže $38,94\Omega$

Na **obr.43** jsou uvedeny časové závislosti napětí pro FV panel, baterii a zátěž. Jelikož se jedná o vybíjení, charakteristiky klesají. Protože se baterie vybíjí, dochází k poklesu napětí na FV panelu i na zátěži.



Obr. 43: Časová závislost průběhu napětí polonabité baterie při procesu vybíjení

Na **obr.44** je vidět, že proud tekoucí do zátěže je největší. Tento proud je dán součtem proudu dodávaného FV panelem a proudem dodávaným baterií. Vidíme, že změna průběhu proudu fotovoltaického panelu kopíruje změnu proudu akumulátoru. Změny proudu jsou patrně způsobeny změnami intenzity dopadajícího slunečního záření. Opět se dostáváme do situace, kdy se nemění proud zátěže. Znovu se ale jedná pouze o zdánlivou skutečnost. Z důvodu nutnosti zobrazení časových průběhů proudů FV panelu, akumulátoru a zátěže, má osa y poměrně hrubě nastavené měřítko. Tím pádem je znemožněno pozorování změn proudu o přibližně 10 % maximální hodnoty.

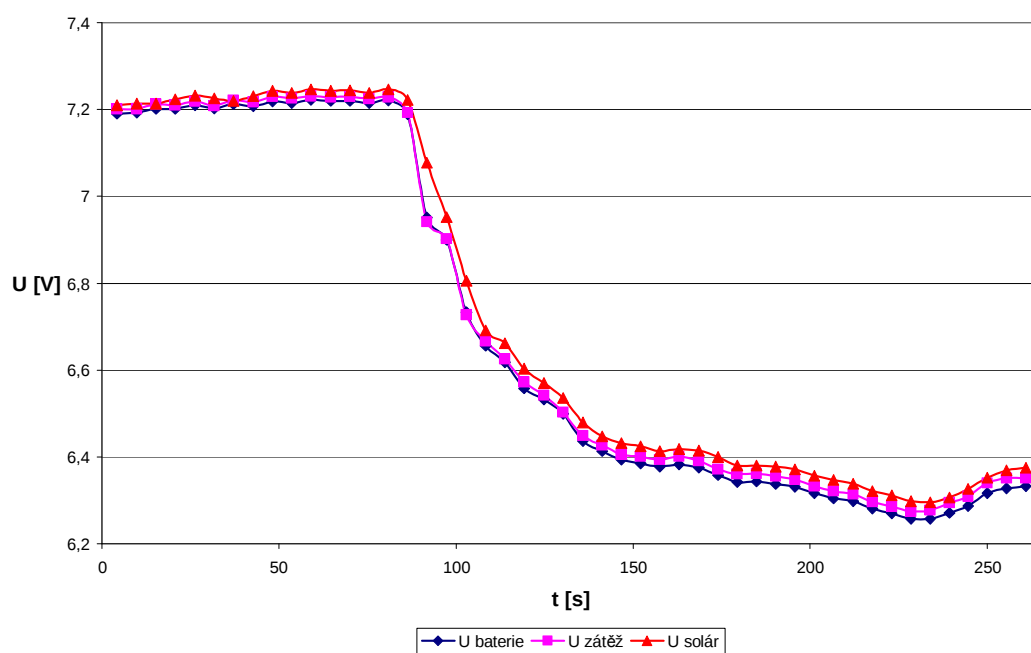


Obr. 44: Časová závislost průběhu proudu polonabíje baterie při procesu vybíjení

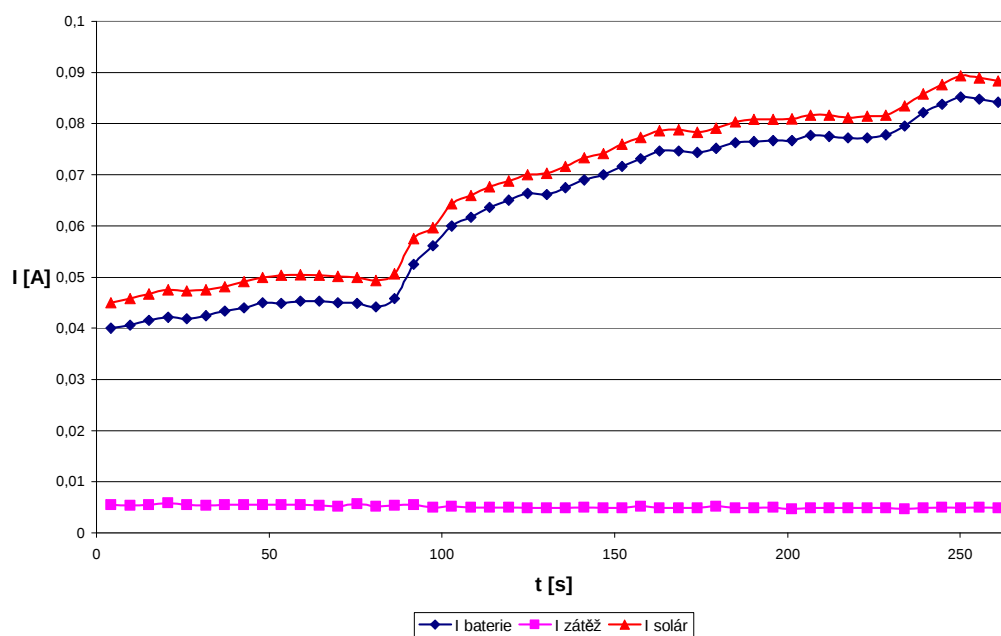
3. Baterie vybitá (sulfatovaná)

a) nabíjení – velikost zátěže 1350Ω

Na **obr.45** je typický průběh napětí při nabíjení sulfatovaného akumulátoru. Hodnoty napětí se stávají nereálnými, v tomto případě 3,6 V na článek. Tento jev je způsoben velkými krystaly síranu olovnatého $PbSO_4$ pokrývajících elektrody, které mají za následek obrovský vnitřní odpor akumulátoru a z toho plyne i velmi špatná elektrická vodivost. Při dalším postupu nabíjení se síran začíná rozpouštět a napětí klesá. Pokud vezmeme **obr.46**, vidíme, že proud pozvolna roste a blíží se hodnotě 0,1 A. Tento růst by mohl být způsoben opět měnícím se osvitem panelu, např. v důsledku mraků pohybujících se po obloze.



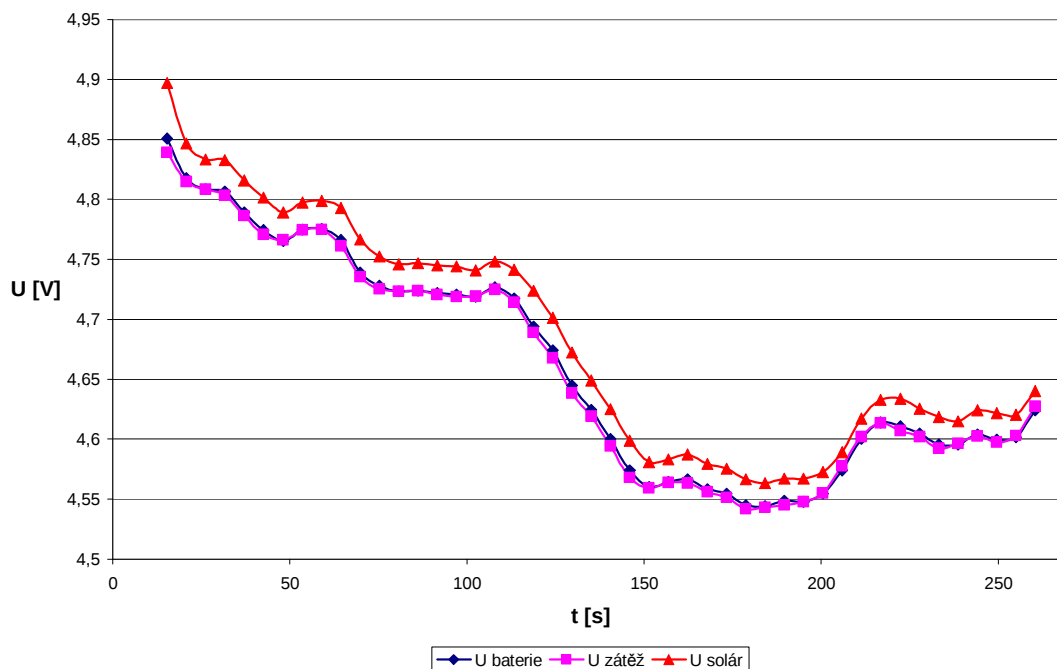
Obr. 45: Časová závislost průběhu napětí sulfatované baterie při nabíjení



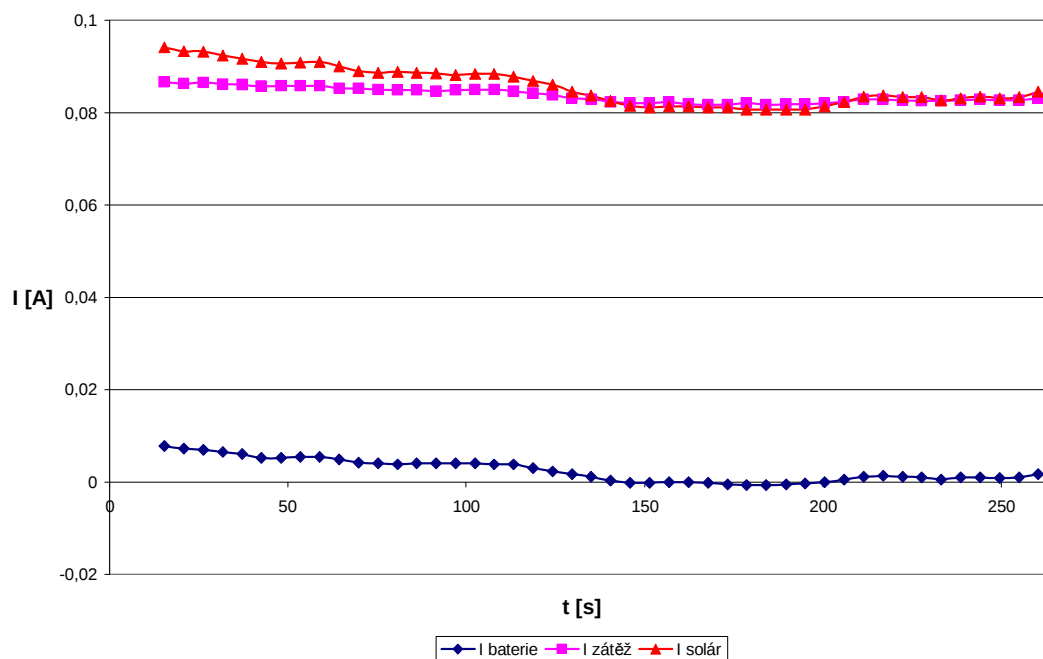
Obr. 46: Časová závislost průběhu proudu sulfatované baterie při nabíjení

b) stagnace – velikost zátěže $56,5\Omega$

Systém, resp. velikost zatěžovacího odporu byla nastavena tak, aby veškerý elektrický proud generovaný FV panelem procházel zátěží. Na začátku měření docházelo k mírnému nabíjení a to mělo za následek zvýšení napětí na akumulátoru, FV panelu a zátěži (viz. **obr.47**). V případě našeho sulfatovaného akumulátoru s malou kapacitou stačí ke zvýšení napětí již velmi nepatrný proud. Během tohoto měření se proud akumulátoru ustálil na téměř nulové hodnotě, viz. **obr.48** (modrá křivka), což způsobilo již jen nepatrné změny napětí na FV panelu, akumulátoru a zátěži (řádově setiny voltu).



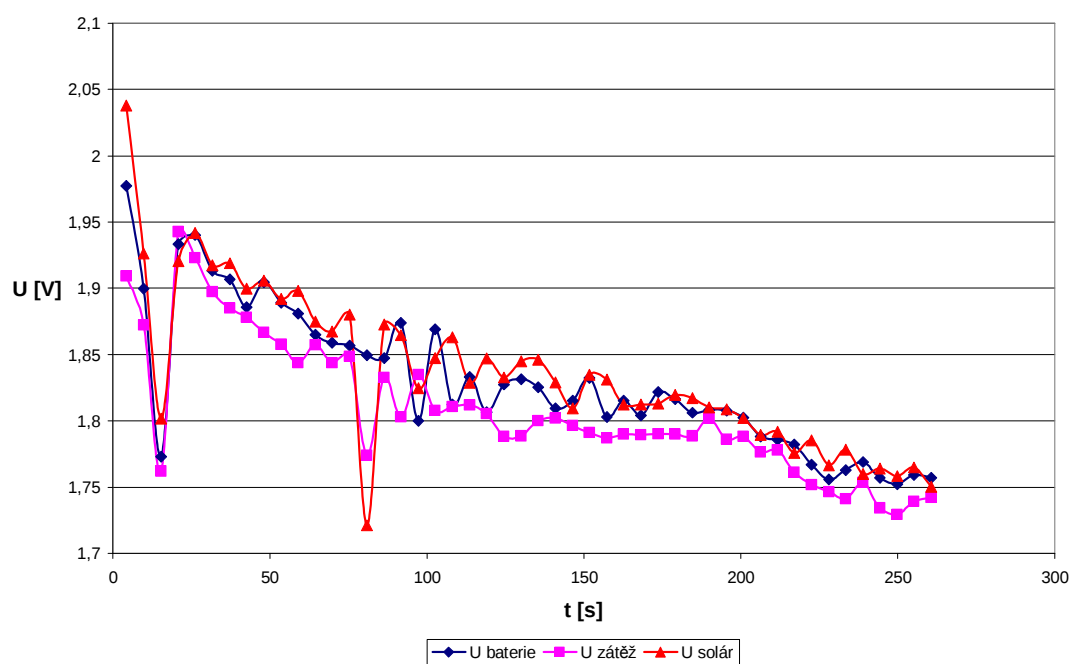
Obr. 47: Časová závislost průběhu napětí sulfatované baterie při stání



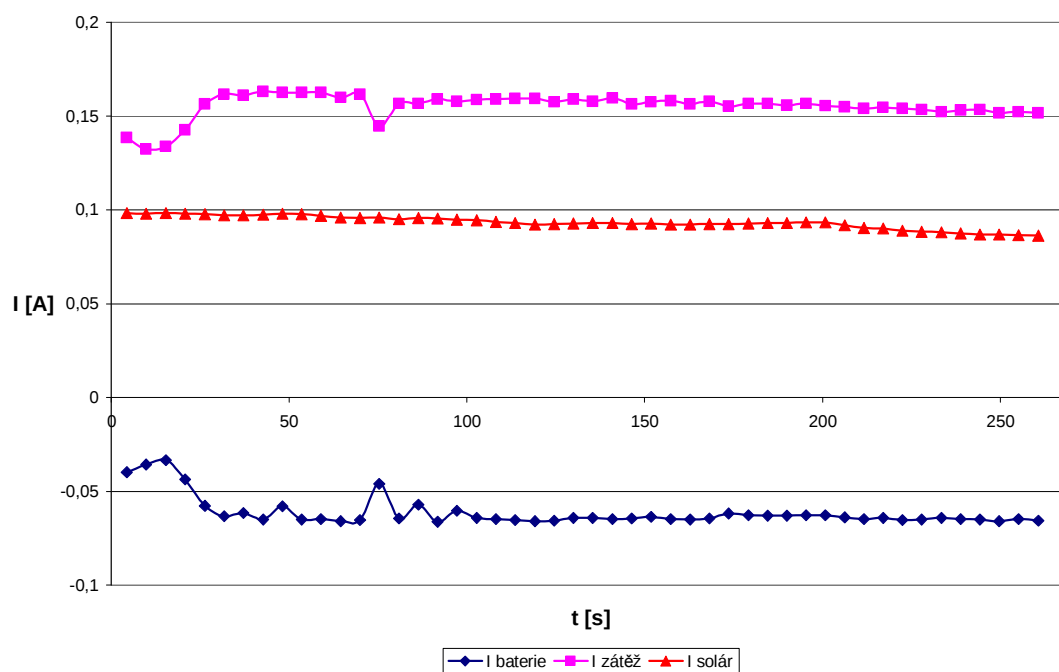
Obr. 48: Časová závislost průběhu proudu sulfatované baterie při stání

c) vybíjení – velikost zátěže $14,36\Omega$

Z **obr.49** je opět vidět, že se jedná o sulfatovaný akumulátor, protože konečné vybíjecí napětí se dostává až na hodnotu 1,75 V, což je již kritická hodnota. Systém je tedy nastaven tak, aby se baterie vybíjela. Opět zde dochází k tomu, že největší proud teče zátěží a je dán součtem proudu FV panelu a proudu baterie.



Obr. 49: Časová závislost průběhu napětí sulfatované baterie při vybíjení



Obr. 50: Časová závislost průběhu proudu sulfatované baterie při vybíjení

6 Závěr

Na začátku této práce jsou uvedeny cíle, kterých má být v průběhu zpracovávání dosaženo. Diplomová práce se zabývá problematikou olověných akumulátorů, jejich funkcí, složením, zabývá se jejich parametry, ale také poruchami, které mohou při jejich používání vzniknout. Další nedílnou součástí této práce je fotovoltaika. V této části práce je uveden význam fotovoltaiky, princip funkce fotovoltaických článků, dále jsou popsány druhy fotovoltaických systémů. V praktické části této Diplomové práce je uveden popis měřicího pracoviště, které bylo v průběhu studia vytvořeno. Jsou zde popsány i měřicí programy fotovoltaicky system.vee a VA fotovoltaicky system.vee, které slouží pro obsluhu měřicího pracoviště. První program je zaměřen na měření v systému o třech větvích, kde se nachází FV panel, akumulátor a zátěž. Druhý program se zaměřuje na automatické měření VA charakteristik FV panelu. Změřené VA charakteristiky a dále časové průběhy napětí a proudů pro různé režimy provozu fotovoltaického systému slouží pouze jako příklady využití pracoviště. Hlavním cílem této Diplomové práce bylo sestavit a zapojit měřicí pracoviště, vytvořit měřicí programy pro měření na fotovoltaickém systému při různých režimech provozu a vyzkoušet funkčnost tohoto pracoviště. Výhoda pracoviště spočívá v tom, že je možné použít různé typy baterií a různé typy fotovoltaických panelů. Při měření byly použity dva neznámé FV panely a byly proměřeny jejich VA charakteristiky a také časové průběhy napětí a proudů FV panelu, akumulátoru a zátěže. Další výhodou pracoviště je snadné zaznamenávání naměřených hodnot, včetně vyhodnocení závislostí prostřednictvím grafů. Kladem pracoviště je i to, že se jedná o otevřený systém, který lze při experimentech upravovat. Pracoviště je plně funkční a může být použito pro potřeby výuky pro malovýkonové aplikace nebo také ve výzkumu v oblasti fotovoltaických panelů i olověných akumulátorů. Snad jedinou nevýhodou pracoviště je to, že je omezeno počtem pozic na měřicích kartách, tj. omezený počet připojitelných rezistorů (přibližně 40 pozic) a proudové omezení těchto karet (maximální měřený proud 1A). Pokud bychom potřebovali měřit větší proudy, museli bychom nakoupit karty s větší proudovou zatížitelností a elektronickou programovatelnou zátěží, jejíž cena se pohybuje v řádech desítek tisíc Kč.

7 Seznam použité literatury

- [1] NEVORAL, M. *Studium objemových změn aktivních hmot elektrod olověného akumulátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 29 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Křivík, Ph.D.
- [2] *Welcome to Zdenek Vlasak NET* [online]. 2002, 29.9.2002 [cit. 2011-05-11]. Olověné automobilové akumulátory. Dostupné z WWW: <http://www.zvlasak.net/baterie_s.pdf >
- [3] KŘIVÍK, Petr. *Studium vlivu přtlaku na vlastnosti kladných elektrod olověného akumulátoru*. Brno : FEKT VUT Brno, 2001. 94 s. Dizertační práce. ISBN 80-214-2352-8.
- [4] KOZUMPLÍK, Josef. *Chemické zdroje proudu ve sdělovací technice*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1981. 231 s. ISBN 80-302-5326-8.
- [5] *FCC Public* [online]. 2003 [cit. 2011-05-11]. Akumulátory, od principu k praxi . Dostupné z WWW: <http://www.fccpublic.cz/knihy/Knihy_ukazky_AKU.pdf>. ISBN 80-86534-03-0.
- [6] *Vítejte na webu G & SOŠPg Jeronýmova* [online]. 2005-2011 [cit. 2011-05-11]. Olověné akumulátory. Dostupné z WWW: <<http://www.jergym.hiedu.cz/~canovm/elektro/clanky2/olov.pdf> >.
- [7] *Fakulta informačních technologií VUT v Brně* [online]. 2000-2005 [cit. 2011-05-11]. Primární a sekundární elektrochemické články. Dostupné z WWW: <http://www.fit.vutbr.cz/~krivka/oldpersonal/elektricke_clanky.htm>.
- [8] QUASCHING, Volker. *Understanding Renewable Energy Systems*. London : EARTHSCAN, 2005. 289 s. ISBN 1-84407-128-6.
- [9] Bc. NEVORAL, M. *Fotovoltaický systém pro RAPS aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 20 s. Vedoucí Semestrálního projektu 2 Ing. Petr Křivík, Ph.D.
- [10] *Czech RE Agency* [online]. 2003-2009 [cit. 2011-05-11]. Czech RE Agency - Fotovoltaika pro každého. Dostupné z WWW: <<http://www.czrea.org/cs/druhy-oze/fotovoltaika#fv>>.

- [11] Internetová stránka: http://www.zsseifertova.ji.cz/vzdel_a_vych/slundos/fv.pdf, 27.4.2010; tato stránka již není dostupná a nebylo možno vytvořit citaci
- [12] JOYCE [online]. 2008 [cit. 2011-05-11]. Instalační pokyny k FV modulům ASEC. Dostupné z WWW: <http://www.joyce-energie.cz/files/files/Instalan_pokyny_ASEC_v5.pdf>.
- [13] STOJAN, R. *Zařízení pro měření intenzity slunečního záření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Vaněk, Ph.D.
- [14] FIEDLER, *Elektronika pro ekologii* [online]. 2010 [cit. 2011-05-11]. FIEDLER, Elektronika pro ekologii. Dostupné z WWW: <<http://www.fiedler-magr.cz/cs/produkty/snimace-meteorolog-velicin/globalni-radiace/pyranometr-sg002>>.
- [15] H test [online]. 2009-2011 [cit. 2011-05-11]. H test. Dostupné z WWW: <<http://www.htest.cz/index.php?produkt=480>>.
- [16] SOLARTEC [online]. 1993-2011 [cit. 2011-05-11]. SOLARTEC...to čemu rozumíme, je fotovoltaika. Dostupné z WWW: <<http://www.solartec.cz/cs/fv-systemy/o-fotovoltaice/fotovoltaika.html>>.

8 Seznam obrázků

Obr. 1: Znázornění konstrukce olověného akumulátoru [2].....	9
Obr. 2: Konstrukční uspořádání článku akumulátoru [2]	12
Obr. 3: Příklad kladné elektrody [4]	13
Obr. 4: Znázornění vnitřního fotoelektrického jevu znázorňujícího přechod elektronů z valenčního do vodivostního pásu přes zakázaný pás v důsledku dopadajícího záření [8]	16
Obr. 5: Struktura křemíkového článku [10].....	17
Obr. 6: Znázornění principu solárního článku na pásovém modelu energií [8]	17
Obr. 7: Znázornění fotovoltaického článku, panelu a fotovoltaického pole [11]	18

Obr. 8:	Schématické znázornění paralelního spojení FV panelů, převzato z [8].....	19
Obr. 9:	Schématické znázornění nejjednoduššího FV systému [11]	20
Obr. 10:	Blokové schéma autonomního systému s akumulací el. energie [11].....	21
Obr. 11:	Blokové schéma FV systému spojeného se sítí [11]	22
Obr. 12:	Olověný akumulátor (baterie).....	24
Obr. 13:	Vyobrazení dvou modulů se zatěžovacími rezistory	25
Obr. 14:	Bočníky pro měření proudu.....	26
Obr. 15:	Kufříkový solární panel ruské výroby	27
Obr. 16:	Druhý testovaný solární panel	27
Obr. 17:	Zapojení by-passové diody jednoho stringu, převzato z [8].....	28
Obr. 18:	Pyranometr (vlevo) [14],	29
Obr. 19:	Termočlánek (vpravo), převzato z [13]	29
Obr. 20:	Měřič EMRSI	29
Obr. 21:	Kompletní zapojení EMRSI [13].....	30
Obr. 22:	Pohled na desku měřiče EMRSI ze strany spojů.....	31
Obr. 23:	Osazovací plán měřiče EMRSI	32
Obr. 24:	Uživatelské okno programu fotovoltaicky systém.vee.....	34
Obr. 25:	Uživatelské okno programu VA fotovoltaicky system.vee	35
Obr. 26:	Zjednodušené schéma měřicího pracoviště	35
Obr. 27:	Celkový pohled na měřicí pracoviště	36
Obr. 28:	Bližší pohled na měřicí pracoviště.....	37
Obr. 29:	Schéma zapojení pracoviště pro měření VA charakteristik.....	38
Obr. 30:	VA charakteristiky standardního panelu	38

Obr. 31:	VA charakteristika panelu, obr.16, při intenzitě dopadajícího záření $230W / m^2$, maximální proud $620mA$	39
Obr. 32:	VA charakteristika panelu, obr.16, při intenzitě dopadajícího záření $180W / m^2$, maximální proud $484mA$	39
Obr. 33:	VA charakteristika malého kufříkového solárního panelu při intenzitě dopadajícího slunečního záření $400W / m^2$, maximální proud $102mA$	40
Obr. 34:	VA charakteristika malého kufříkového solárního panelu při intenzitě dopadajícího slunečního záření $205W / m^2$, maximální proud $52,3mA$	41
Obr. 35:	Časová závislost průběhu napětí nabité baterie při nabíjení.....	42
Obr. 36:	Časová závislost průběhu proudu nabité baterie při nabíjení.....	43
Obr. 37:	Časová závislost průběhu napětí nabité baterie při stání.....	44
Obr. 38:	Časová závislost průběhu proudu nabité baterie při stání	44
Obr. 39:	Časová závislost průběhu napětí nabité baterie při vybíjení	45
Obr. 40:	Časová závislost průběhu proudu nabité baterie při vybíjení.....	46
Obr. 41:	Časová závislost průběhu napětí polonabité baterie při procesu nabíjení	47
Obr. 42:	Časová závislost průběhu proudu polonabité baterie při procesu nabíjení	47
Obr. 43:	Časová závislost průběhu napětí polonabité baterie při procesu vybíjení.....	48
Obr. 44:	Časová závislost průběhu proudu polonabité baterie při procesu vybíjení	49
Obr. 45:	Časová závislost průběhu napětí sulfatované baterie při nabíjení.....	50
Obr. 46:	Časová závislost průběhu proudu sulfatované baterie při nabíjení	50
Obr. 47:	Časová závislost průběhu napětí sulfatované baterie při stání	51
Obr. 48:	Časová závislost průběhu proudu sulfatované baterie při stání.....	52
Obr. 49:	Časová závislost průběhu napětí sulfatované baterie při vybíjení.....	53
Obr. 50:	Časová závislost průběhu proudu sulfatované baterie při vybíjení	53