

Studentská tvůrčí a odborná činnost
STOČ 2011

**FOTOVOLTAICKÁ TRANSFORMACE
ENERGIE - VZDÁLENÝ EXPERIMENT PO
INTERNETU**

TOMÁŠ ŘEHÁK

**VEDOUCÍ PRÁCE:
Prof. Ing. František Schauer, DrSc.**

24. dubna 2011
FAI UTB ve Zlíně

Klíčová slova: *Fotovoltaika, ISES, vzdálený pokus, sluneční energie.*

Anotace: *S použitím systému ISES jsme sestavili experiment pro charakterizaci různých typů fotovoltaických článků. V další části práce ukážeme jeho převedení na vzdálený experiment, šířený po Internetu pomocí programového prostředí ISES WEB CONTROL Kit. K tomu bylo nutno sestavit web stránku pro řízení experimentu, která kromě standardních příkazů využívá programovací jazyk Java pro typické obslužné prvky řídicí stránky. Experiment zprostředkovává webservice, obrazový server, měřicí server a HTML server. Celý experiment je živě monitorován webkamerou. V současné verzi experimentu je možno charakterizovat několik typů PV článků, a to krystalický křemík, amorfni křemík, amorfni karbid křemíku a dva typy organických článků. Jeden z nich je zajímavý tím, že byl pro účely této práce vyroben námi v laboratoři z přírodních materiálů, zde z anthocianinu extrahovaného z květů ibišku (za pomoc děkujeme doc. dr. Jiřímu Touškovi, CSc. z MFF UK).*

OBSAH

1.	Úvod do alternativních zdrojů energie.....	4
2.	Princip fotovoltaického jevu v polovodičích a organických člancích	5
3.	Cíle práce	7
4.	Využité metody	7
5.	Fyzická realizace PC podporovaného experimentu.....	8
6.	ISES web control kit	9
7.	Představení experimentu	12
8.	Závěr a diskuze	13
9.	Použitá literatura	13

1. Úvod do alternativních zdrojů energie

Energie a energetická potřeba je závažným problémem současné vědy a techniky. Celkové zásoby ropy na Zemi se odhadují na 3 bilióny barelů (477 biliónů litrů), které obsahují $1,7 \cdot 10^{22}$ J energie. Stejné množství energie vyzáří na Zemi Slunce za 36 hodin a množství energie, které lidstvo spotřebuje za jeden rok, je vyzářeno Sluncem za pouhou jednu hodinu. Slunce nepřetržitě dodává na Zemi $1,2 \cdot 10^5$ TW, lidská civilizace potřebuje pouze 13 TW energie.



Obr. 1: Využívání energie lidstvem

Odkud lidstvo získává energii? Získáváme 11% z biomasy, 80-85% z fosilních paliv, jež se na Zemi vytvořila během posledních 200 miliónů let a pouze 0,015% ze slunečního záření + 0,3% jako sluneční teplo. To je velmi málo, když slunce se dá využívat pro získávání prakticky veškeré energie nutné pro život - jak nejdůležitější elektrické energie, tak pro zpracování záření přímo na teplo a ohřev vody, popřípadě vytápění objektů.

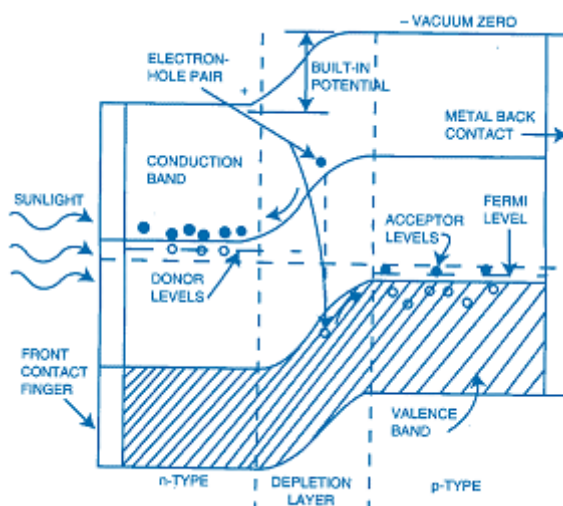
Energie ze slunce je chápána jako módní doplněk nebo výpomoc energii elektrické ze společné sítě, místo aby byla chápána jako nutnost pro další existenci lidstva. Tento stav je nutně potřeba změnit a dále zlepšovat technologie získávání energie ze slunce a aplikovat je ve stále rostoucí lidské spotřebě.

V budoucnosti, až budou fosilní paliva kompletně spálena, bude elektrická energie nejdůležitějším druhem energie a její získávání z přírodních zdrojů prvořadým úkolem. Slunce se jeví jako velmi vhodný zdroj energie, avšak bohužel v dnešní době nejsou dostatečné technologie a dostatečná přeměna energie k masovějšímu využití a nahrazování především uhelných elektráren. Elektrárny zabírají pro relativně malý výkon obrovskou plochu (mnohdy zúrodnitelnou, popř. jinak využitelnou).

Takzvané alternativní zdroje energie, do nichž patří energie sluneční, energie větru a využívání proudění vody, atd., mají bohužel i svá úskalí. Například slunce svítí pouze ve dne, i když vysoká spotřeba elektrického proudu je taktéž v noci. Příbojové elektrárny dodávají energii pouze ráno, větrné elektrárny jsou nesmírně nákladné a hyzdí malebnost přírodního okolí a tak dále. To ale nesmí zabránit zdokonalování alternativních technologií a rozsáhlému využívání těchto zdrojů energie.

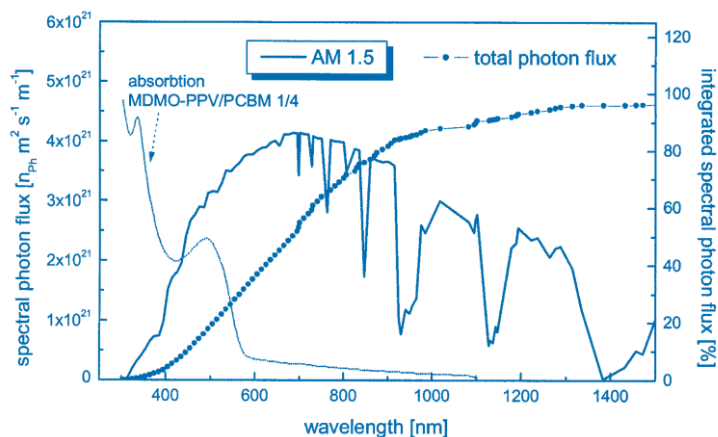
2. Princip fotovoltaického jevu v polovodičích a organických člancích

Fotovoltaický jev či fotoefekt je fyzikální jev, při němž jsou elektrony uvolňovány (vyzařovány, emitovány) z látky (nejčastěji z polovodiče) v důsledku absorpce kvanta elektromagnetického záření (např. z rentgenového záření nebo z viditelného světla) danou látkou. Emitované elektrony jsou poté označovány jako fotoelektrony a jejich uvolňování se označuje jako fotoelektrická emise (fotoemise). Význam fotovoltaiky se projevil hlavně kosmonautice, kde je prakticky jediným zdrojem elektrické energie.



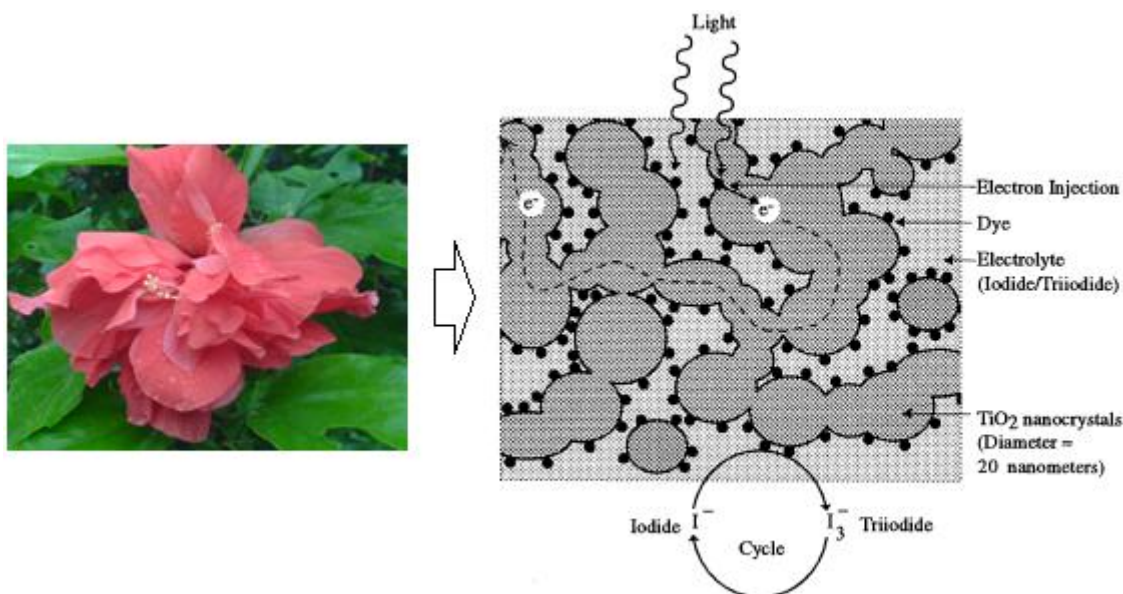
Obr. 2: Fotovoltaický jev

Fotovoltaický článek je polovodičová součástka určité aktivní plochy schopná přeměňovat světlo na elektrickou energii. Využívá při tom výše popsany fotovoltaický jev. Níže je popsáno rozložení schopnosti využití přichozího záření příslušící různým frekvencím záření. Nejčastěji je využíváno pásmo 600-1000nm vlnové délky záření, tedy částečně ještě viditelného světla a delších vlnových délek. Na to se velmi úzce váže využití různých druhů materiálů pro výrobu fotovoltaických článků, z důvodu různé účinnosti této přeměny energie při odlišné vlnové délce.



Obr. 3: Využití záření různých vlnových délek

Velké naděje se vkládají do tzv. slunečních baterií, které přeměňují sluneční energii na elektrickou. Zdá se, že právem, protože na každý 1 m^2 osvětlené plochy dopadá (při kolmém dopadu) za každou 1 s asi 750 J energie. Její efektivní přeměnou na elektrickou energii bychom mohli značně zlepšit současnou energetickou situaci. Jako transformátory této energie na elektrickou nepřicházejí v úvahu pouze polovodičové materiály (vysoká cena, složitý výrobní proces, velké vynaložení energií na výrobu), ale v současné době je trend vývoje fotovoltaických organických článků. Tyto články pracují na odlišném principu.



Obr. 4: Ibišek + Princip funkce organického fotovoltaického článku

Organické barvivo, které je v co největším množství zachyceno na povrchu i uvnitř pórovité struktury oxidu titaničitého (TiO_2), vlastní hydroxylové $-\text{OH}$ skupiny a také kyslík $=\text{O}$. Celá tato chemická reakce je výsledkem alkoholového vázání protonů, které se soustředí společně s hydroxylovými skupinami na povrchu pórovité struktury TiO_2 . Dopadne-li na molekulu barviva kvantum světla, je excitován elektron do vyšší energetického orbitu. Tento elektron („exciton“ – nosič náboje) přestoupí do struktury TiO_2 . Tyto excitované elektrony putují skeletem struktury TiO_2 ke sběrači, anodě. Celý tento systém funguje na principu regenerace páru díra-elektron za cyklické regenerace elektronů z elektrolytu jako jejich donoru.

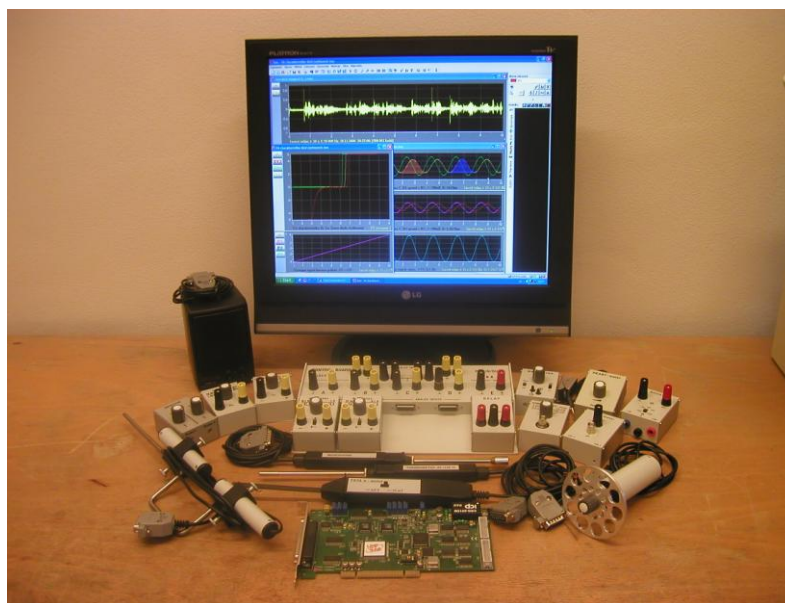
Princip výroby vlastního článku je velmi jednoduchý. Nejdříve je nutné rovnoměrně nanést velmi tenkou vrstvu pórovité struktury TiO_2 na jedno z vodivých skel. Poté se vrstva musí na 30 minut dát zapéct při teplotě přibližně 450°C . Mezi tím si připravíme silný čaj z květů ibišku, který necháme 15 minut vyluhovat. Po zapčení vrstvy TiO_2 vložíme sklo do připraveného roztoku barviva. Po 15 minutách je absorbován dostatek barviva do TiO_2 . Připravíme si druhé sklo, na jehož vodivou plochu nanese me co největší množství uhlíku pomocí obyčejné tužky. Po oschnutí roztoku barviva obě skla k sobě přiložíme vodivými plochami a pevně přitiskneme. Posledním krokem přípravy je aplikace elektrolytu na spoj skel, který postupným sáknutím do článku zaujme celý objem.

3. Cíle práce

1. Cílem mojí práce je vytvořit plně počítačově orientovaný experiment pro charakterizaci fotovoltaických článků různých typů, jako prostředek přeměny zářivé energie na elektrickou.
2. Transformovat takto fungující experiment na vzdálený, pracující na bázi server-klient. Docílit maximálního softwarového řešení s minimální hardwarovou podporou.
3. Vyrobit elektrochemický fotovoltaický článek na bázi přírodních látek (v mém případě organického barviva), provést jeho charakterizaci a srovnat jej se standardními typy článků.
4. Dále motivační myšlenkou mé práce je také představit využívání tohoto typu energie studentům a široké veřejnosti, v uživatelsky a edukačně velmi příjemné a jednoduché formě.

4. Využití metody

ISES (Internet School Experimental System) je otevřený systém pracující pod operačním systémem Windows. Prostřednictvím tohoto systému jsme schopni jednoduše realizovat jak reálné, tak i vzdálené experimenty v našich laboratořích. Systém se fyzicky skládá z control panelu, datové karty, sady proměnných modulů a snímacích prvků (asi 40) a taktéž softwarového grafického a vyhodnocovacího prostředí.



Obr. 5: Systém ISES

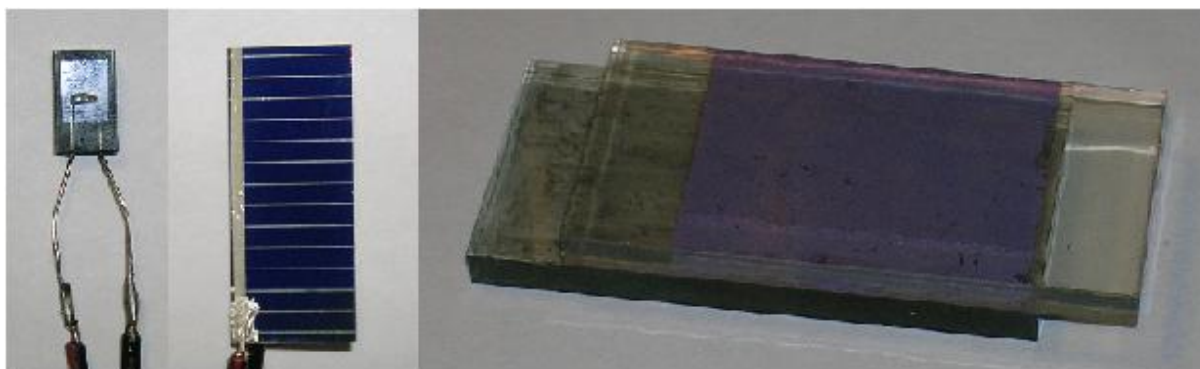
ISES moduly jsou snadno zaměnitelné a počítač, za předpokladu využití automatické kalibrace, automaticky zjistí jejich přítomnost, a upraví měřený rozsah veličin. Moduly se dělí na vstupní (odečet dat měřených veličin z dané aplikace, např. ampérmetr, voltmetr, sonar) a na výstupní (pro zásah do ovládaných laboratorních prvků, např. booster, relé).

5. Fyzická realizace PC podporovaného experimentu

V této části se už budeme zabývat experimentem samotným, jeho hardwarovou skladbou. Rozebereme jednotlivé součásti aparatury a přiblížíme jejich činnost. Pokus se skládá z následujících částí: fotovoltaiické články, reléová deska, svítilna, zdroj, webkamera a zařízení systému ISES (Control panel, interfaceová karta) + počítač.

- **Fotočlánky**

V současné době mám z celkového počtu pěti plánovaných PV článků k dispozici pouze tři. Fotodiodu značky Tesla, článek z amorfního křemíku a organický elektrochemický článek vlastní výroby.



Obr. 6: Fotočlánky (Si dioda, Si panel, organický článek vlastní výroby)

- **Reléová deska**

Reléová deska je připojena přes sběrnici do interfaceové karty. Obsahuje 16 samostatně řízených dvoupolohových relé (tři svorky: vstup, nulový výstup, jedničkový výstup). V případě nečinnosti systému jsou relé přepnuta na nulový výstup. U experimentu je deska využita pro výběr fotovoltaiického článku k charakterizaci.

- **Simulátor slunečního záření**

Svítilna o výkonu 35W je upnuta kleštinami a upevněna na stojanu. Je připojena ke zdroji, regulace jejího výkonu je řízena napětím z ISES Control boardu. Je namířena kolmo na osvětlované PV články. V pokusu může být buzena na 4 různé úrovně osvětlení (vypnuto, 40%, 70% a 100% výkonu nebo plynule).

- **Zdroj/zesilovač**

Použitý zdroj má dva nezávislé kanály s nastavitelným napětím v rozmezí 0-20V a taktéž nastavitelným elektrickým proudem. Ovládání výstupu zesilovače je realizováno buď ručně potenciometrem, nebo je ovládáno vstupním napětím, čehož u vzdáleného pokusu využíváme.

- **ISES control board**

ISES control board je zprostředkovatelem mezi měřicími členy ISESu (zásuvnými moduly) a převodníkovou interfaceovou deskou na vyhodnocování dat z měření. Náš pokus potřebuje pouze odečet napětí a proudu, jsou tedy zapojeny pouze voltmetr (rozsah 10V, kanál B) a ampérmetr (rozsah 0,1A, kanál A). Dále jsou využity oba analogové výstupy jednak pro ovládání výkonu svítivky (kanál F), a jednak pro napájení článku požadovaným napětím pro charakterizaci (kanál E).

- **Interfaceová karta pro sběr dat**

ISES control panel je napojen do karty pro sběr dat. Tato karta v provedení professor obsahuje A/D a D/A 12-bit převodníky, 16x A/D vstup (0-5V), dále softwarový převod, doba jednoho převodu 60 ms, 1x D/A výstup (+/- 5V), vzorkovací kmitočet počítače XT, AT/12MHz a je klasicky zapojena jako rozšiřující karta přes rozhraní PCI.

- **WEB kamera**

Pokus je neustále snímán webovou kamerou, kterou je možno podle potřeby natočit, avšak momentálně je nastavena pouze pro statický záběr vzdáleného pokusu - zabírá lampu a osvětlované PV články.

- **Server**

Celý experiment je nyní provozován na nepřetržitě běžícím fyzickém stroji a je přístupný přes veřejnou IP adresu (<http://195.178.94.142/>) nebo přes doménu (<http://remotelab1.fai.utb.cz/>). K počítači je připojena jak webkamera, tak ISES control panel. Potřebný software zprostředkovává obsah do internetu.

6. ISES web control kit

Technicky, vzdálený experiment probíhá v místě odlišném od experimentátora. V důsledku toho se skládá ze dvou částí, jedna je experimentální hardware (se zkoumaným fenoménem), a druhým je software pro přenos pokynů od experimentátora k experimentu a pro přenos naměřených dat k experimentátorovi. Veškerá komunikace probíhá přes Internet pomocí webových služeb a odpovídajícího komunikačního rozhraní.

Jedná se o soubor serverů zajišťujících činnost a vzdálené řízení experimentu. Kit také obsahuje množství java appletů, které se při tvorbě HTML webové stránky vkládají do zdrojového kódu. Zkompilované applety se řídí pomocí nastavených parametrů. ISES kit obsahuje i aplikace, které vytvářejí komunikaci s hardwarem (MeasureServer, ImageServer a HTTPRelayServer). Pro správnou funkci je potřeba provozovat standardní webserver zprostředkovávající činnost těchto aplikací do internetu. V následujících odstavcích si popíšeme činnost jednotlivých serverů, poté i funkci java appletů.

- **WEB server**

Tento program je odpovědný za vyřizování požadavků HTTP od klientů. Klient ve webovém prohlížeči zadá buď příslušnou IP adresu, nebo slovní jméno serveru. WEB server na klientovo vyžádání odešle sdílený obsah, webovou stránku s applety a je-li na řadě, provádí měření. V mém případě byl nahrazen původně zamýšlený a dodávaný program PinkNet pro nedostatečnou funkčnost volně dostupným programem Nginx.

- **Image Server**

Tento program umožňuje, ve spolupráci s javovským appletem, umístit na webovou stránku video z VFW (Video for Windows) kompatibilního zdroje, například z USB webové kamery. Program periodicky ukládá aktuální obraz ze zdroje do souboru formátu jpeg. Jméno souboru, rozlišení a kvalitu komprese je možno měnit. Snímá obraz z webkamery každou sekundu a odesílá ho do adresáře WEB serveru, z něhož je odeslán do appletu na webové stránce.

- **Measure Server**

MeasureServer tvoří hlavní část celého měřicího systému. Zajišťuje realizaci serverové strany experimentu. Program se skládá ze dvou logických částí. První z nich jsou pluginy. Jedná se o knihovny .dll soubory poskytující pevně stanovený interface, pomocí kterého poskytují informace o pinech, ze kterých je možné číst hodnoty, či do kterých je možno hodnoty zapisovat.

Pluginy realizují přístup k zařízení či implementují logiku experimentu. Druhou částí je vlastní program MeasureServer. Ten při svém startu nainicializuje dostupné pluginy a následně poskytuje vzdáleným uživatelům funkce pro čtení a zápis hodnot jednotlivých pinů. Kromě toho také nabízí možnost logování hodnot pinů (dlouhodobé, s velmi nízkou frekvencí v řádu sekund, či krátkodobé s frekvencí v řádu desítek Hz), záznam prováděných experimentů a následné získání těchto hodnot klientskou stranou.

Je zde nastavení, jako například maximální počet klientů, nastavení časového maxima měření jednoho klienta, atd. Nejdůležitější část se nachází v položce „Devices“. Jsou zde jednotlivé položky aktivních prvků (pinů), pomocí kterých experiment komunikuje s klientem, také jejich vlastní konfigurace.

Řízení mého experimentu je implementováno pomocí metody programování „ScriptablePlugin“. Tento plugin je v současnosti nejsilnějším a zároveň nejsložitějším z pluginů. Díky němu je možné dosáhnout některých činností, na které starší pluginy nestačí. Například generování složitějšího signálu či vysokorychlostní experiment. Základní princip fungování je podobný pluginu „ConfLogicPlugin“ (jednoduché nastavení přes interface MeasureServeru) s tím, že operace pro jednotlivé piny jsou místo sady pravidel zadány jednoduchým programem. Tento program se po spuštění načte jako nastavení MeasureServeru.

- **Java applety**

Pro tvorbu WWW stránky využívající služeb těchto serverů slouží sada JAVA appletů. Tyto applety tvoří balíček `virtuallabmeasureclient.jar`. S výjimkou několika samostatně fungujících appletů jsou všechny ostatní applety závislé na přítomnosti appletu `connectionhub`, který zajišťuje spojení se serverem a poskytuje jim funkce pro komunikaci. `Connectionhub` dále umožňuje posílání událostí, kdy se jeden či několik appletů zaregistrují pro příjem události, kterou může jiný applet generovat. Tento mechanismus je používán hlavně pro předávání příkazů mezi tlačítka a řídicími applety. Příklady appletů:

HUB:	<code>virtuallabmeasureclient.hub.basic.connectionhub.class</code>
Webkamera:	<code>virtuallabmeasureclient.visualize.class</code>
Průběžný graf:	<code>virtuallabmeasureclient.hub.modules.graph2d.class</code>
Tlačítko:	<code>virtuallabmeasureclient.hub.modules.valuesend.class</code>
Výpis hodnoty:	<code>virtuallabmeasureclient.hub.modules.singlevalue.class</code>
Slider:	<code>virtuallabmeasureclient.hub.modules.scrollbar.class</code>

- **HTML webová stránka**

Po zažádání se uživateli načte webová stránka experimentu. Obsahuje zobrazení fyzického pokusu, graf měřených hodnot, slidery a tlačítka pro řízení výstupního napětí s ISESu a pro ovládání intenzity světla. Dále obsahuje množství polí s výpisem měřených hodnot (napětí, proud, výkon, osvětlení, řídicí napětí) a výsledný zprůměrovaný graf určený k exportu hodnot. Celý experiment je graficky zaobalen do estetického kabátku CSS stylů, rozdělení stránky na jednotlivé části je řešeno tabulkami.

Ve zdrojovém kódu jsou dle potřeby jejich zobrazení za sebe naskládány a volány Java applety společně s jejich parametry, pomocí kterých dochází k nastavování hodnot pro jejich práci. Řízení appletu ukážeme na jednoduchém příkladu tlačítka:

```
<applet codebase="/" archive="virtuallabmeasureclient.jar"
code=virtuallabmeasureclient.hub.modules.valuesend.class width=88 height=23>
  <param name=hub_name value="hub">
  <param name=device_name value="photovoltaics_light_buttons_write">
  <param name=description value="100%">
  <param name=value value="3048">
  <param name=refresh value="100">
</applet>
```

Kde v tagu `<applet>` se vyskytuje jeho název, velikost a následují parametry. Parametr se jménem „hub“ určuje řídicí applet, „device name“ určuje řízený pin, „description“ zobrazený popis tlačítka, „value“ hodnotu poslanou pinu jeho při stisku a „refresh value“ jako doba mezi aktualizacemi stavu tlačítka.

- **Shrnutí**

V provozu, na straně serveru, se vytváří webová stránka, která obsahuje applety pro měření a digitální zobrazování vstupních hodnot, applety pro grafické zobrazení vstupních hodnot, applety pro přenos naměřených dat, applety pro přenos obrazu z webové kamery, atd. Tato data jsou předávána ze serveru na klientský počítač pomocí webové služby. Na straně klienta je pouze standardní prohlížeč (Internet Explorer, Mozilla, atd.) a implicitní podpora Java, bez jakýchkoliv nutných dalších úprav.

7. Představení experimentu

Ukážeme si možnosti měření na virtuálním experimentu. Lze naměřit grafy voltampérových charakteristik různých fotovoltaický článku, měnit intenzitu jejich osvětlení ve všech čtyřech předvolených stupních nebo také plynule. Poté zprůměrovanou charakteristiku vykreslíme do výsledného grafu a naměřená data lze exportovat. Okamžité hodnoty napětí, proudu, výkonu, osvětlení a řídicího napětí jsou digitálně zobrazeny v grafické podobě.

Měření začíná automaticky ihned po spuštění vzdáleného experimentu. Jelikož byl signál značně napětově a částečně i proudově zašuměný, data jsou nově průměrována (375 naměřených hodnot do jedné vykreslené) a vykreslována do průběžného grafu pouze osmkrát za sekundu. Data jsou průměrována opakovaně pro každou různou změnu hodnoty nastavení slideru řídicího napětí.

Jelikož naměřená data bývají nevhodná k exportu (shluky bodů), průběžný graf se překresluje do dalšího grafu s úpravou naměřených hodnot. Z celých skupin hodnot se vypíše pouze hodnota průměrná. Čím více je provedeno měření daného bodu řídicího napětí, tím větší přesnosti se docílí.

The image shows a control panel for a PV cell experiment. It is divided into four main sections:

- Voltage:** A slider control with a numerical display showing -0.597 V .
- Light intensity:** A control with buttons for 'Off', '40%', '70%', and '100%', and a slider with a numerical display showing 0% .
- Solar cell type:** Two rows of buttons. The first row is for 'Connect silicon cells' with options 'c-Si', 'a-Si:H', and 'a-SiC:H'. The second row is for 'Connect organic cells' with options 'Electrochemical Organics' and 'Nano Organics'.
- Data recording:** A section with a text input field containing the number '4', a checked checkbox labeled 'Leave experiment number', and two buttons: 'Start of recording' and 'Stop of recording'.

Obr. 7: Ukázka nastavení pro charakterizaci PV článků

Data se dají jednoduše exportovat pro další využití, například výpočty nebo pro práci v grafických programech. Export se uskuteční pomocí dvou tlačítek (CSV text a HTML tabulka) na novou stránku obsahující hodnotu napětí, proudu, počet provedených měření pro dané hodnoty a střední kvadratické odchylky měřených veličin. Na konci tabulky jsou přidány dva sloupce s měřením velikosti chyby.

Voltage	Current	Count of measurements	RMSQ(U)	RMSQ(I)
U[V]	I[mA]	n[-]	[V]	[mA]
-0,554	-1,7018	12	0,0005	0,0002
-0,5518	-1,7021	6	0,0012	0,0004
-0,5454	-1,7026	9	0,0009	0,0005
-0,5445	-1,7044	1	0	0
-0,5421	-1,7043	2	0,0024	0

Obr. 8: Ukázka exportovaných dat

8. Závěr a diskuze

Cílem mojí práce bylo vytvořit plně počítačově orientovaný experiment pro charakterizaci různých typů fotovoltaických článku. Nejzajímavější částí práce bylo vytvoření a charakterizace vlastního elektrochemického článku, který si již dnes může vyrobit každý. Technologie výroby je velmi jednoduchá, použitý materiál lehce dostupný. Dále se lze vyhnout jednotvárnosti, pro funkci organického článku můžeme extrahovat různá organická barviva z přírodních zdrojů, a tak měnit jeho účinnost. Především je důležitá motivační myšlenka práce, využívání sluneční energie. Experiment by měl plnit vzdělávací účely především pro studenty, ale samozřejmě může být využíván i širokou veřejností, v uživatelsky a učebně velmi příjemné a jednoduché formě.

9. Použitá literatura

1. F.Schauer, F. Lustig and M. Ozvoldova, "Remote Materials Science Internet Experiments: Solid State Photovoltaic Cell Characterization", *J. Mater. Ed. (USA)* Vol. 29, No. (3-4) (2007) pp.193-200 and F.Schauer and also M. Ozvoldova and F. Lustig, "Real remote physics experiments across Internet - inherent part of Integrated e-Learning", *iJOE* Vol. 4, Issue 1, February, 2008, p. 53.
2. NARAYAN, Monishka R.; RATULI, Atul. Fabrication and Characterization of Hibiscus rosa-sinensis based Dye Sensitized Solar Cell. *World Renewable Energy Congress*. 2011, 7 s.
3. SMESTAD, Greg P. Education and solar conversion : Demonstrating electron transfer. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 1998, 23 s.
4. Virtual lab dokumentace přiložená k ISES Web Control kit.