



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření a vyhodnocování V-A
charakteristik fotovoltaických článků

Praha, 2009

Autor : Matouš Pokorný

Abstrakt

Tato práce se zabývá chybami při určování parazitních odporů fotovoltaických článků. Sériový a paralelní odpor R_s a R_{sh} jsou určeny metodou derivací za krajních podmínek a metodou dvou V-A charakteristik při různém osvětlení. Výsledky výpočtu jsou srovnány s odpory určenými pomocí zjednodušeného modelu. Teoretické výpočty jsou ověřeny na reálných hodnotách, které byly změřeny na fotovoltaickém článku SOLARTEC měřicím systémem Pasan II.

Abstract

This work deals with errors in determining the parasitic resistance of photovoltaic cells. Serial and parallel resistances R_s and R_{sh} are determined by the method of derivative for extreme conditions and method of IV curves of the two different lights. The results of calculation are compared with the resistances identified using a simplified model. Theoretical calculations are verified on real terms, which were measured at the photovoltaic cells SOLARTEC measurement system Pasan IId.

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Vítězslavovi Bendovi, CSc. za vedení a pomoc při psaní práce. Rád bych poděkoval též RNDr. Evě Novákové, CSc. a prom. mat. Vojtěchu Bartíkovi, CSc. za pomoc s matematickým aparátem a Ing. Petru Borešovi, CSc. za pomoc s fyzikální stránkou problému.

Obsah

Úvod	3
1 Teoretické předpoklady	4
1.1 Fotovoltaický článek	4
1.1.1 Model fotovoltaického článku	7
1.2 Metody určení parazitních odporů fotovoltaických článků	9
1.2.1 Metoda derivací za krajních podmínek	9
1.2.2 Metoda dvou V-A charakteristik při různém osvětlení	12
1.3 Chyby určení parazitních odporů	14
1.3.1 Absolutní chyba	14
1.3.2 Relativní chyba	15
2 Aplikace teoretických úvah	17
2.1 Měřicí systém PASAN IIId	17
2.2 Měření na fotovoltaickém článku SOLARTEC	19
2.3 Velikost chyb určení parazitních odporů fotovoltaického článku SOLARTEC	22

Literatura	25
Přílohy	29

Úvod

Matematický model fotovoltaiického článku je složitý pro běžné úvahy, a tak se zjednodušuje. Obsahem této práce je, jak velké chyby se dopustíme, když provedeme zjednodušení matematického modelu pro určení parazitních odporů fotovoltaiických článků.

Nejprve uvažuji úplný dvoudiodový matematický model fotovoltaiického článku a z něho určím sériový a paralelní odpor. Pro výpočet vyjádřím V-A charakteristiku fotovoltaiického článku jako funkci dvou proměnných. Porovnáám analyticky vypočtené parazitní odpory s odpory vypočtenými ze zjednodušeného modelu a určím vztahy pro absolutní a relativní chyby. Změřené hodnoty pak dosadím do teoretických vztahů a výpočtu chyby jako konkrétní čísla. Na závěr pak shrnu získané poznatky.

Kapitola 1

Teoretické předpoklady

1.1 Fotovoltaický článek

Fotovoltaický článek, hovorově solární článek, slouží k přímé přeměně sluneční, světelné energie na energii elektrickou. Využívá k tomu fotovoltaického jevu, který známe od roku 1839 díky francouzskému fyzikovi Antoine-César Becquerelmu (1788 - 1878). První praktickou aplikací fotovoltaického článku s účinností 6% byla dodávka elektrické energie pro ruskou vesmírnou družici Sputnik 3, která vzlétla do kosmu roku 1957.



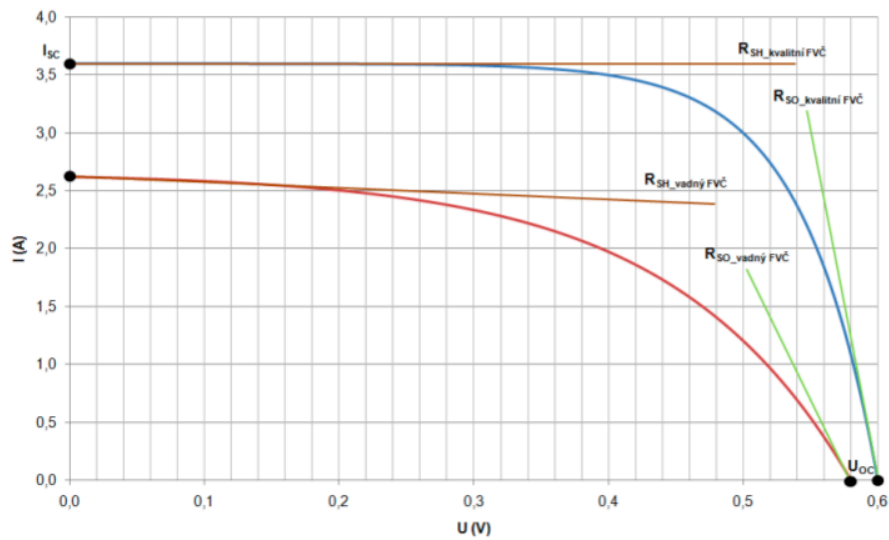
Obrázek 1.1: Fotovoltaický článek, převzato z (14)

Z počátku byly fotovoltaické články, pro svou vysokou cenu, výsadou pouze kosmických projektů, kde se staly výhradními zdroji elektrické energie. Jak se zdokonalila a zlevnila technologie výroby, dostaly se solární články i do pozemních aplikací. Ropné plošiny a plachetnice na volném moři, nouzový telefon na dlouhém úseku dálnice, oáza uprostřed pouště nebo ovčí farma v australských savanách, tato místa spojuje nedostupnost elektrické energie z centrální elektrárny, proto se zde začaly solární články na Zemi užívat nejdříve. Potřeba elektrické energie byla vykoupena stále poměrně vysokou pořizovací cenou celého ostrovního solárního systému¹. Teprve až v posledních dvou desetiletích ceny materiálu klesly a technologie výroby pokročila natolik, že se fotovoltaické články začaly používat ve velkém měřítku jako primární zdroj elektrické energie. V dnešní době jsou již běžně k vidění střechy rodinných domů, které jsou pokryty fotovoltaickými moduly o celkovém výkonu řádově jednotek kWp ². Na polích místo obilí rostou konstrukce pro uchycení tisíců fotovoltaických panelů. Meziročně vzroste instalovaný výkon solárních elektráren v České republice dvojnásobně až trojnásobně.

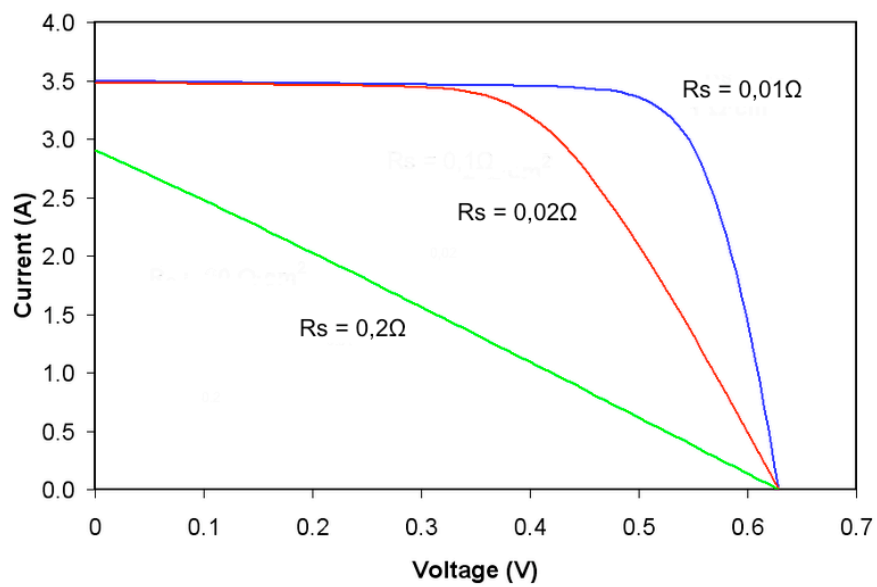
Kvalita fotovoltaických článků přímo ovlivňuje, kolik energie se ze Slunce můžeme vyrobit, popřípadě kolik peněz nám fotovoltaická elektrárna vygeneruje. Parametrům, které určují kvalitu fotovoltaických článků, bychom měli při výběru vhodné technologie pro solární elektrárnu věnovat patřičnou pozornost. Kvalitu solárního článku lze na první pohled určit z volt-ampérové (V-A) charakteristiky, plnicího faktoru FF , sériového a paralelního odporu R_s a R_{sh} . Všechny tyto veličiny spolu úzce souvisí. Na obrázku si ukážeme V-A charakteristiky kvalitního a špatného fotovoltaického článku a vliv velikosti odporů R_s a R_{sh} na V-A charakteristiku fotovoltaického článku.

¹system, který není galvanicky spojen s veřejnou distribuční sítí elektrické energie

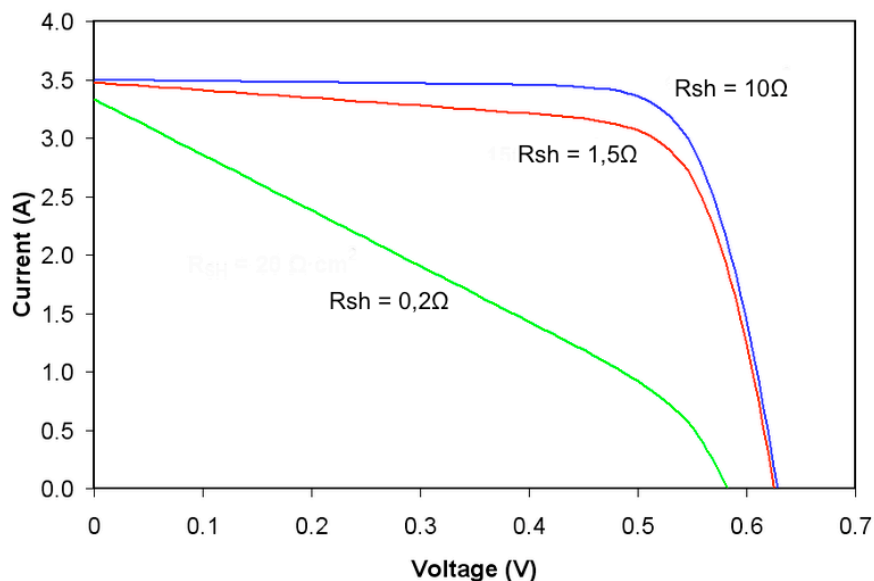
²špičkový výkon za definovaných podmínek



Obrázek 1.2: V-A charakteristiky kvalitního a vadného fotovoltaického článku, převzato z (15)



Obrázek 1.3: Vliv sériového odporu R_s na V-A charakteristiku fotovoltaického článku, převzato z (4)

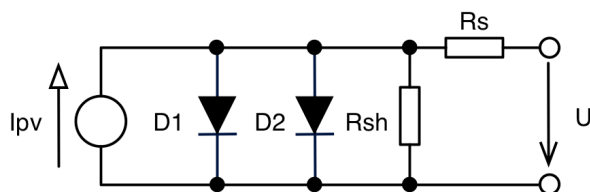


Obrázek 1.4: Vliv paralelního odporu R_{sh} na V-A charakteristiku fotovoltaického článku, převzato z (4)

Prameny : (3), (5), (4)

1.1.1 Model fotovoltaického článku

Abychom mohli určit jednotlivé parametry fotovoltaického článku, je vhodné článek nahradit souborem jednoduchých částí, které lze snadno popsat a jejichž principy jsou již dobře známé. V našem případě popíšeme solární článek rovnicí 1.1 jako elektrický obvod 1.5 obsahující jednoduché lineární i nelineární elektrické součástky. Fotovoltaický článek generuje proud, bez osvětlení se chová jako polovodičová dioda, všudepřítomné ztráty a nedokonalost výroby určují velikost parazitních odporů R_s a R_{sh} . Proto se náhradní model bude skládat z proudového zdroje I_{PV} , který představuje proud generovaný článkem, sériového a paralelního odporu R_s a R_{sh} , to jsou odpory parazitní a reprezentují výkonové ztráty a nedokonalost výroby. R_s zastupuje ohmický



Obrázek 1.5: Schéma dvoudiodového modelu fotovoltaického článku

odpor spojů a přívodů. R_{sh} nahrazuje svody ve fotovoltaickém článku. Diody D_1 a D_2 reprezentují polovodičový přechod, na kterém vzniká fotovoltaický jev.

$$I = I_{PV} - I_{01} \left(\exp \left(\frac{q(U + R_s I)}{kT} \right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp \left(\frac{q(U + R_s I)}{\alpha kT} \right) - 1 \right) - \frac{U + R_s I}{R_{sh}} \quad (1.1)$$

Dioda D_1 vychází z Shockleyho rovnice. Tato rovnice obecně popisuje model P-N přechodu. Dioda D_2 reprezentuje P-N přechod při nízkém napětí na diodě, kdy je vliv Shockleyho diody D_1 nepatrný. A naopak, D_1 reprezentuje P-N přechod při vyšším napětí, kdy je nepatrný vliv D_2 . Kompletní fyzika fotovoltaického článku je popsána například v (1).

Prameny : (1), (5)

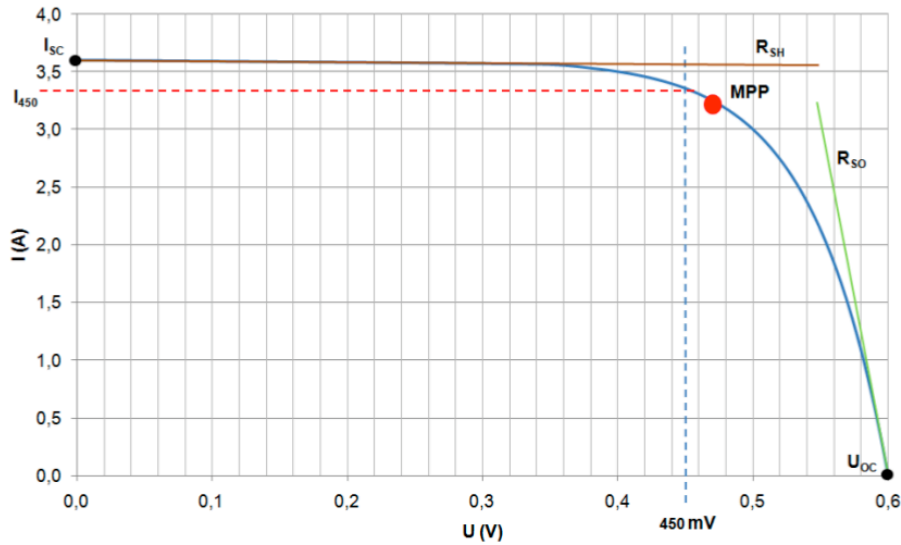
1.2 Metody určení parazitních odporů fotovoltaických článků

Už jsme si řekli, že sériový a paralelní odpor R_s a R_{sh} můžeme považovat za měřítko kvality fotovoltaického článku. Jak dobré nebo přesné měřítko představují parazitní odpory závisí na přesnosti určení těchto odporů. Norma předepisuje metody určení odporů za předem definovaných podmínek. Tyto podmínky jsou velmi zjednodušeny a mnoho vlivů se v nich zanedbává. Jedno zjednodušení spočívá v zanedbání vlivu druhého odporu při určování odporu prvního. Například když určuji paralelní odpor dle normy metodou derivací za krajních podmínek, zanedbávám vliv sériového odporu a naopak. Jak velké chyby se tímto zanedbáním dopouštíme, to je obsahem následujících kapitol.

Poznámka: Technické normy, o kterých se v textu zmiňují jsou se týkají měření V-A charakteristik fotovoltaických článků a modulů, parametrů článků a článků obecně. Konkrétně jsou to pak normy: ČSN EN 60904-1 (364604), ČSN EN 60904-1 ed. 2 (364604), ČSN EN 60904-3 (364604), ČSN EN 60904-3 ed. 2 (364604), ČSN EN 60904-9 (364604), ČSN EN 61194 (364620), ČSN EN 61277 (364620), ČSN EN 61829 (364630), ČSN EN 50461 (364636)

1.2.1 Metoda derivací za krajních podmínek

Metoda derivací za krajních podmínek určuje sériový a paralelní odpor R_s a R_{sh} jako směrnice tečen v krajních bodech. Krajními body, podmínkami, rozumíme body na osách proudu a napětí. Na ose proudu je to bod I_{sc} ($U = 0$), zkratový proud. Na ose napětí je to bod $U = U_{oc}$ ($I = 0$), napětí otevřeného obvodu.



Obrázek 1.6: Princip metody derivací za krajních podmínek, převzato z (16)

V-A charakteristiku fotovoltaického článku popíšeme funkcí dvou proměnných 1.2 a spočteme diferenciál $\frac{dU}{dI}$, který vyjadřuje směrnici tečny v bodě $U = U_{oc}$. Výsledek tohoto výpočtu mohu vzhledem k metodám určení uvažovaných v normách považovat za správnou, neboť jsem nezanedbal vliv paralelního odporu R_{sh} . Později tento výsledek srovnáme s odporem získaným standardním postupem dle normy.

$$f(I(U), U) = I - I_{PV} + I_{01} \left(\exp \left(\frac{q(U + R_s I)}{kT} \right) - 1 \right) + I_{02} \left(\exp \left(\frac{q(U + R_s I)}{\alpha kT} \right) - 1 \right) + \frac{U + R_s I}{R_{sh}} \quad (1.2)$$

Diferenciál funkce, z kterého vyjdeme je rovnice 1.3. Proměnná proud I je funkcí $I(U)$.

$$\frac{\partial f(I(U), U)}{\partial I(U)} dI(U) + \frac{\partial f(I(U), U)}{\partial U} dU = 0 \quad (1.3)$$

Pak parciální derivace funkce dle proměnných $I(U)$ a U jsou

$$\frac{\partial f(I(U), U)}{\partial I} = 1 + \frac{qR_s I_{01}}{kT} \exp\left(\frac{q(U + R_s I)}{kT}\right) + \frac{qR_s I_{02}}{\alpha kT} \exp\left(\frac{q(U + R_s I)}{\alpha kT}\right) + \frac{R_s}{R_{sh}} \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial f(I(U), U)}{\partial U} = \frac{qI_{01}}{kT} \exp\left(\frac{q(U + R_s I)}{kT}\right) + \frac{qI_{02}}{\alpha kT} \exp\left(\frac{q(U + R_s I)}{\alpha kT}\right) + \frac{1}{R_{sh}} \quad (1.5)$$

Derivace 1.4 a 1.5 dosadíme do 1.3

$$\frac{dU}{dI} = -\frac{1 + R_s \frac{\partial f(I(U), U)}{\partial U}}{\frac{\partial f(I(U), U)}{\partial U}} \quad (1.6)$$

Po dosazení bodu $U = U_{oc}$ a úpravách předešlé rovnice 1.6 dostáváme vyjádření tečny v daném bodě, které reprezentuje vnitřní dynamický odpor fotovoltaického článku v bodě $U = U_{oc}$.

$$\frac{dU}{dI} = -R_s - \frac{1}{\frac{qI_{01}}{kT} \exp\left(\frac{qU_{oc}}{kT}\right) + \frac{qI_{02}}{\alpha kT} \exp\left(\frac{qU_{oc}}{\alpha kT}\right) + \frac{1}{R_{sh}}} \quad (1.7)$$

Pro paralelní odpor R_{sh} budu postupovat obdobně. Vyjádřím sklon tečny V-A charakteristiky fotovoltaického článku v bodě $I = I_{sc}$ pomocí diferenciálu $\frac{dI}{dU}$. Dosadíme derivace 1.4 a 1.5 do rovnice 1.3 a dostaneme vztah 1.8.

$$\frac{dI}{dU} = -\frac{\frac{\partial f(I(U), U)}{\partial U}}{1 + R_s \frac{\partial f(I(U), U)}{\partial U}} \quad (1.8)$$

Dosažením bodu $I = I_{sc}$ a následnými úpravami získáme výsledný vztah pro sklon tečny.

$$\frac{dI}{dU} = - \frac{1}{R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_{sh}} + \frac{qI_{01}}{kT} \exp\left(\frac{qI_{sc}R_s}{kT}\right) + \frac{qI_{02}}{\alpha kT} \exp\left(\frac{qI_{sc}R_s}{\alpha kT}\right)}} \quad (1.9)$$

Prameny: (1), (6), (7), (8), (9)

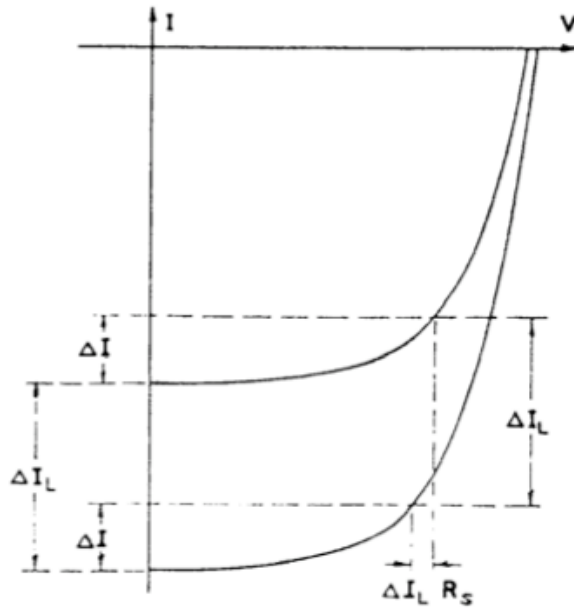
1.2.2 Metoda dvou V-A charakteristik při různém osvětlení

Metoda využívá dvou V-A charakteristik při různém osvětlení. Princip metody ilustruje graf 1.7. Na charakteristikách vyneseme bod $I = I_{sc} - \Delta I_{PV}$, U . Hodnota ΔI_{PV} je pro obě charakteristiky stejná. Nejlepší poloha bodu je v koleni V-A charakteristiky, kde je změna veličin největší. Odečteme rozdíl veličin U_1, U_2, I_1, I_2 . Pak sériový odpor R_s definuje vztah 1.10. Tohoto výsledku docílíme použitím zjednodušeného matematického modelu, který vyjadřuje vztah 1.11, úplný dvoudiodový model je popsán v předchozí části rovnicí 1.1.

$$R_s = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1} \quad (1.10)$$

$$I = I_{PV} - I_0 \exp\left(\frac{U}{U_t}\right) \quad (1.11)$$

Vyjádření správné hodnoty $\frac{\Delta U}{\Delta I}$ dostaneme dosazením rovnice úplného dvoudiodového modelu 1.1 a následnými úpravami.



Obrázek 1.7: Princip metody dvou V-A charakteristik při různém osvětlení, převzato z (8)

$$\frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{1}{\frac{1}{R_s} + \frac{A-B}{\Delta U}} \quad (1.12)$$

$$A = I_{01} \exp\left(\frac{qI_{sc1}R_s}{kT}\right) + I_{02} \exp\left(\frac{qI_{sc1}R_s}{\alpha kT}\right) + \frac{I_{sc1}R_s}{R_{sh}} \quad (1.13)$$

$$B = I_{01} \exp\left(\frac{qI_{sc2}R_s}{kT}\right) + I_{02} \exp\left(\frac{qI_{sc2}R_s}{\alpha kT}\right) + \frac{I_{sc2}R_s}{R_{sh}} \quad (1.14)$$

Prameny: (8), (10), (7)

1.3 Chyby určení parazitních odporů

V této kapitole srovnáme výsledky z předchozích kapitol s výsledky obecně uznávanými, které jsou popsány v normách (viz. literatura) a používány ve většině měřících systémů a simulátorů.

Dle normy je sériový odpor R_s definován vztahem 1.15 (platí pro $U = U_{oc}$, $I = 0$).

$$-R_s = \frac{dU}{dI} \quad (1.15)$$

Paralelní odpor R_{sh} je pak definován vztahem 1.16 (platí pro $I = I_{sc}$, $U = 0$).

$$\frac{1}{R_{sh}} = \frac{dI}{dU} \quad (1.16)$$

1.3.1 Absolutní chyba

Absolutní chybu obecně definuje vztah 1.17. Kde Δ je absolutní chyba, A je přesná hodnota a a je přibližná hodnota, jejíž chybu určujeme.

$$\Delta = |A - a| \quad (1.17)$$

V našem případě uvažuji jako přesnou hodnotu vztahy z předešlé kapitoly. Přibližné hodnoty jsou hodnoty obecně používané, spočtené dle normy. Absolutní chyba pro sériový odpor R_s metodou derivací za krajních podmínek.

$$\Delta R_s = \left| -\frac{1}{\frac{qI_{01}}{kT} \exp\left(\frac{qU_{oc}}{kT}\right) + \frac{qI_{02}}{\alpha kT} \exp\left(\frac{qU_{oc}}{\alpha kT}\right) + \frac{1}{R_{sh}}} \right| \quad (1.18)$$

Absolutní chyba pro paralelní odpor R_{sh} metodou derivací za krajních podmínek.

$$\Delta \frac{1}{R_{sh}} = \left| -\frac{1}{R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_{sh}} + \frac{qI_{01}}{kT} \exp\left(\frac{qI_{sc}R_s}{kT}\right) + \frac{qI_{02}}{\alpha kT} \exp\left(\frac{qI_{sc}R_s}{\alpha kT}\right)}} - \frac{1}{R_{sh}} \right| \quad (1.19)$$

Absolutní chyba pro sériový odpor R_s metodou dvou V-A charakteristik při různém osvětlení.

$$\Delta R_s = \left| -\frac{R_s}{1 + \frac{\Delta U}{R_s(A - B)}} \right| \quad (1.20)$$

$$A = I_{01} \exp\left(\frac{qI_{sc1}R_s}{kT}\right) + I_{02} \exp\left(\frac{qI_{sc1}R_s}{\alpha kT}\right) + \frac{I_{sc1}R_s}{R_{sh}} \quad (1.21)$$

$$B = I_{01} \exp\left(\frac{qI_{sc2}R_s}{kT}\right) + I_{02} \exp\left(\frac{qI_{sc2}R_s}{\alpha kT}\right) + \frac{I_{sc2}R_s}{R_{sh}} \quad (1.22)$$

1.3.2 Relativní chyba

Relativní chybu obecně definuje vztah 1.23. Kde δ je relativní chyba, Δ je absolutní chyba a A je přesná hodnota.

$$\delta = \frac{\Delta}{|A|} \quad (1.23)$$

Jako přesnou hodnotu uvažují vztahy z předešlé kapitoly. Absolutní hodnoty jsou spočteny výše.

Relativní chyba pro sériový odpor R_s metodou derivací za krajních podmínek.

$$\delta R_s = \left| 1 - \frac{R_s}{R_s + \frac{1}{\frac{qI_{01}}{kT} \exp\left(\frac{qU_{oc}}{kT}\right) + \frac{qI_{02}}{\alpha kT} \exp\left(\frac{qU_{oc}}{\alpha kT}\right) + \frac{1}{R_{sh}}}} \right| \quad (1.24)$$

Relativní chyba pro paralelní odpor R_{sh} metodou derivací za krajních podmínek.

$$\delta \frac{1}{R_{sh}} = \left| 1 - \frac{\frac{1}{R_{sh}}}{\frac{1}{R_{sh}} + \frac{1}{\frac{qI_{01}}{kT} \exp\left(\frac{qI_{sc}R_s}{kT}\right) + \frac{qI_{02}}{\alpha kT} \exp\left(\frac{qI_{sc}R_s}{\alpha kT}\right)}} \right| \quad (1.25)$$

Relativní chyba pro sériový odpor R_s metodou dvou V-A charakteristik při různém osvětlení.

$$\delta R_s = -\frac{R_s(A - B)}{\Delta U} \quad (1.26)$$

$$A = I_{01} \exp\left(\frac{qI_{sc1}R_s}{kT}\right) + I_{02} \exp\left(\frac{qI_{sc1}R_s}{\alpha kT}\right) + \frac{I_{sc1}R_s}{R_{sh}} \quad (1.27)$$

$$B = I_{01} \exp\left(\frac{qI_{sc2}R_s}{kT}\right) + I_{02} \exp\left(\frac{qI_{sc2}R_s}{\alpha kT}\right) + \frac{I_{sc2}R_s}{R_{sh}} \quad (1.28)$$

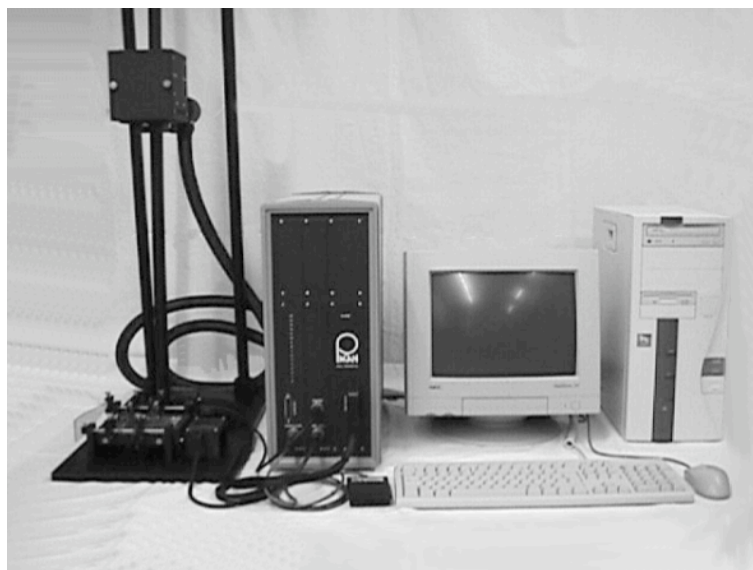
Prameny : technické normy vypsané v literatuře, (11)

Kapitola 2

Aplikace teoretických úvah

2.1 Měřicí systém PASAN IId

Měřicí systém PASAN IId umožňuje měření elektrických veličin na fotovoltaickém článku. Skládá se ze simulátoru slunečního záření a vlastního měřicího systému. Měřicí sestavu ilustruje obrázek.

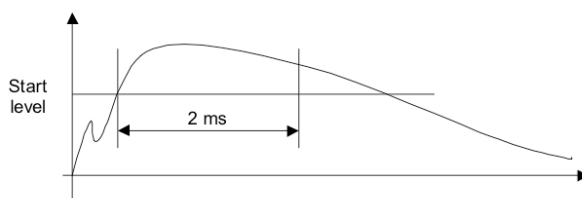


Obrázek 2.1: Měřicí soustava Pasan IId, převzato z (12)

Simulátor umožňuje testování fotovoltaický článků i mimo sluneční záření. Jako zdroj osvětlení je použita xenonová výbojka, podobná jako ve fotografickém blesku, jen výkonnější. Její spektrum je nejvíce podobné slunečnímu spektru. Celé osvitové zařízení je umístěno na svislých lyžinách. Posunem výbojky nahoru a dolů se nastavuje intenzita osvětlení.

Hlavní výhody simulátoru osvětlení jsou opakovatelnost měření, snadné nastavení požadované intenzity záření a nezávislost na slunečním svitu. Nevýhodou pak je odlišnost vyzařovaného spektra výbojky od spektra slunečního.

Měřicí systém se připojuje k počítači, kterým se nastavují parametry měření a sbírají data. Na jedno osvětlení odměří systém celou V-A charakteristiku fotovoltaického článku. Průběh intenzity osvětlení v čase záblesku výbojky je vidět na obrázku 2.2. Hodnoty veličin I_{sc} , U_{oc} , Eff , FF , MPP , U_{mpp} , I_{mpp} , R_s , R_{sh} jsou automaticky určeny v počítači z naměřené V-A charakteristiky. Vztahy pro výpočet veličin jsou definovány patřičnými normami.



Obrázek 2.2: Průběh osvětlení během záblesku simulátoru Pasan IId, převzato z (12)

Základní vlastnosti simulátoru slunečního záření a měřicího systému jsou shrnuty v tabulkách. Podrobné technické informace lze najít ve firemní literatuře (12) společnosti Pasan SA.

Prameny: (12)

Applicable standard	EIC 60904-9
Overall class	Better than A
Illuminated area	22 x 22 cm max.
Max. capacitors voltage	600 V
Pulse duration	4 ms
Load time	< 3 s
Light pulse stability	+/- 1% max.
Light intensity	0,7 -1,2 kW/m ²
Light uniformity (full area)	<+/- 1%
Light box size (L x W x H)	34 x 34 x 64 cm
Spectral distribution	IEC class A at 1 kW/m ²
Light incidence angle	90° +/-15° (ASTM E 927-05)
Typical flashtube life	1 million flashes at nominal irradiance
Power supply requirements	included in electronic load
Conformity	CE marking and declaration

Operating mode	4 quadrants sweep, active load
Voltage ranges	0,7 / 1 / 3 / 10 V
Current ranges	0,1 / 0,3 / 1 / 3 / 10 / 30 A
Continuous cell output power	100 W max.
Peak cell output power under flash light	300 W
Ref. Cell sensitivity adjustement	10 - 312 mV step 0.1 mV
Starting irradiance adjustement	0,2 - 2 Sun (kW/m ²), computer adjustable
Temperature measurement	-100 to +100 °C, PT1000 probe
Electrical accuracy	+/- 0.5 % at 25 °C, each channel
Tracability of electrical calibration	METAS (swiss metrology office)
Temperature coefficient	< +/- 200 ppm /°C per channel
D/A and A/D resolution	12 bits (4096 points)
Max. acquisition speed	12 µs / point
Max. number of measuring points	4095
Dimensions (L x W x H)	48 x 43 x 27 cm (Rack 19")
Weight	35 kg approx.
Power supply requirements	115 or 230 V AC, 800 W
Conformity	CE marking and declaration

2.2 Měření na fotovoltaickém článku

SOLARTEC

Aplikaci teoretickým předpokladů jsem provedl na zkušebním fotovoltaickém článku SELB1-SE firmy SOLARTEC. Jedná se o článek z monokrystalického křemíku o standardních rozměrech 15 cm x 15 cm (5"). Článek nemá katalogový list, jedná se o vývojový prototyp. Elektrické vlastnosti tohoto článku jsou získány z měření.

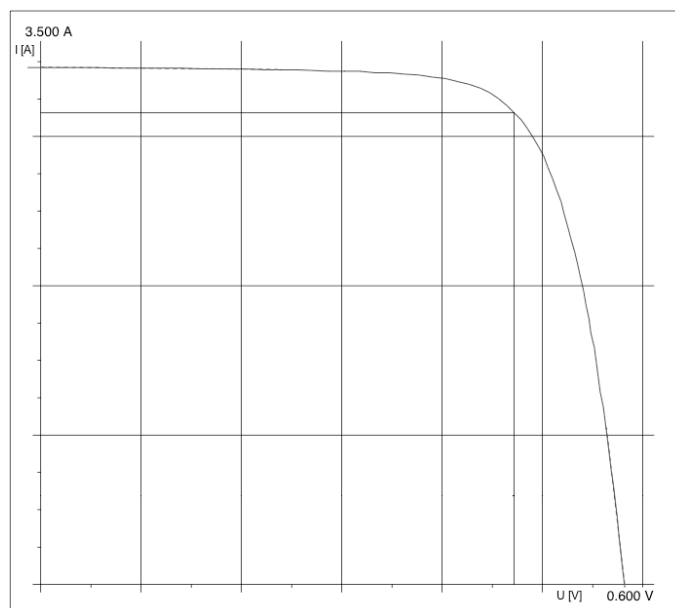
Veličiny	$G = 700 \text{ Wm}^{-2}$	$G = 1000 \text{ Wm}^{-2}$	Jednotky
G	691	985	Wm^{-2}
I_{sc}	3,463	4,647	A
U_{oc}	0,582	0,597	V
E_{ff}	14,52	13,67	%
FF	73,95	72,29	%
MPP	1,490	2,004	W
U_{mpp}	0,472	0,473	V
I_{mpp}	3,160	4,233	A
R_s	0,0174	0,0143	Ω
R_{sh}	15,9211	12,4547	Ω

Tabulka 2.1: Naměřené hodnoty ze systému Pasan IID

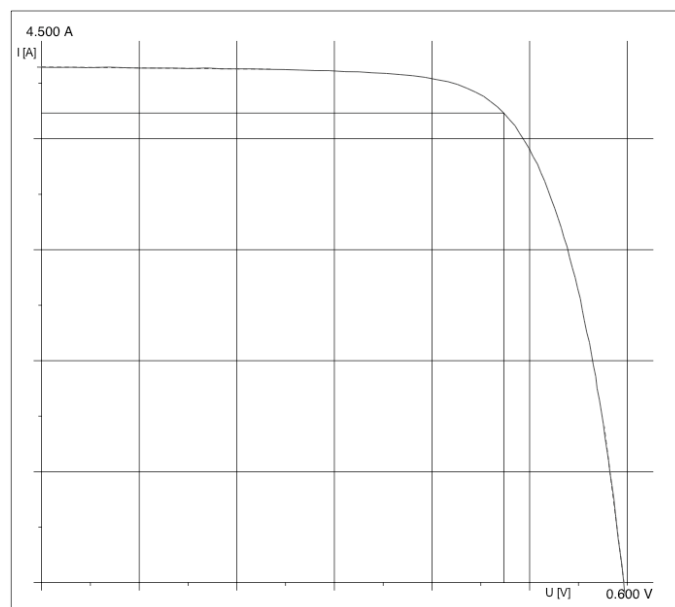
Měření bylo provedeno na měřicím systému Pasan IID při hodnotách intenzity osvětlení 200 Wm^{-2} , 400 Wm^{-2} , 700 Wm^{-2} , 1000 Wm^{-2} a teplotách od 20°C do 100°C , krok 5°C . Pro ověření v této kapitole budu uvažovat hodnoty naměřené za podmínek: intenzita osvětlení 700 Wm^{-2} a 1000 Wm^{-2} , teplota $t = 25^\circ\text{C}$.

Zdrojové soubory a grafy jsou v příloze na CD. Data byla zachycena počítačovým programem SUN SIMULATOR III - LABO version 1.0, standardně dodávaným s měřicím systémem Pasan. V tomto programu je možné data prohlížet a dále s nimi pracovat.

Prameny : (12)



Obrázek 2.3: V-A charakteristika fotovoltaického článku SOLARTEC SELB1-SE při osvětlení 700 W m^{-2} a teplotě $t = 25^\circ \text{C}$



Obrázek 2.4: V-A charakteristika fotovoltaického článku SOLARTEC SELB1-SE při osvětlení 1000 W m^{-2} a teplotě $t = 25^\circ \text{C}$

2.3 Velikost chyb určení parazitních odporů fotovoltaického článku SOLARTEC

Nyní shrneme poznatky z minulé části a kapitoly Chyby určení parazitních odporů. Naměřené hodnoty dosadíme do vztahů teoreticky určených a dostaneme tyto výsledky.

Absolutní chyba pro sériový odpor R_s metodou derivací za krajních podmínek.

$$\Delta R_s = \pm 2,082 \cdot 10^{-7} \Omega \quad (2.1)$$

Relativní chyba pro sériový odpor R_s metodou derivací za krajních podmínek.

$$\delta R_s = 1,456 \cdot 10^{-5} \quad (2.2)$$

Absolutní chyba pro paralelní odpor R_{sh} metodou derivací za krajních podmínek.

$$\Delta \frac{1}{R_{sh}} = \pm 0,005 \Omega \quad (2.3)$$

Relativní chyba pro paralelní odpor R_{sh} metodou derivací za krajních podmínek.

$$\delta \frac{1}{R_{sh}} = 0,068 \quad (2.4)$$

Pro ověření metody dvou V-A charakteristik při různém osvětlení musíme nalézt bod v kolenu charakteristiky, v kterém odečteme napětí U a proud I pro výpočet. Proud ΔI_{PV} nalezneme například takto:

$$\Delta I_{PV} = \frac{I_{sc1} - I_{mpp1} + I_{sc2} - I_{mpp2}}{2} = 0,350 \text{ A} \quad (2.5)$$

Průměruji bod maximálního výkonu, protože leží v kolenu V-A charakteristiky.

Ze dvou V-A charakteristik při intenzitě ozáření 700 Wm^{-2} , 1000 Wm^{-2} odečteme body:

$$I_1 = I_{sc1} - \Delta I_{PV} = 3,013 \text{ A}, U_1 = 0,499 \text{ V} \quad (2.6)$$

$$I_2 = I_{sc2} - \Delta I_{PV} = 4,302 \text{ A}, U_2 = 0,483 \text{ V} \quad (2.7)$$

Nyní už máme potřebné hodnoty pro výpočet absolutní a relativní chyby. Absolutní chyba pro sériový odpor R_s metodou dvou V-A charakteristik při různém osvětlení.

$$\Delta R_s = \pm 1,000 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (2.8)$$

Metoda	Změřený [Ω]	Vypočtený [Ω]	Δ [Ω]	δ [–]
R_s , derivace	0,0143	0,0143	$2,082 \cdot 10^{-7}$	$1,456 \cdot 10^{-5}$
$\frac{1}{R_{sh}}$, derivace	0,0802	0,0861	$5,900 \cdot 10^{-3}$	0,068
R_s , dvě V-A char.	0,0123	0,1240	$1,000 \cdot 10^{-4}$	$8,130 \cdot 10^{-3}$

Tabulka 2.2: Naměřené a spočtené odpory R_s a R_{sh} a jejich chyby

Relativní chyba pro sériový odpor R_s metodou dvou V-A charakteristik při různém osvětlení.

$$\delta R_s = 0,008 \quad (2.9)$$

Výsledky přehledně shrnuje tabulka.

Shrnutí poznatků a závěr

V této práci jsem se zaměřil na srovnání velikostí parazitních odporů fotovoltaických článků. Správnou hodnotu parazitních odporů jsem určil z úplného dvoudiodového modelu fotovoltaického článku 1.1 a poté jsem ji srovnal s běžně užívanou hodnotou určenou ze zjednodušeného modelu. Teoretické předpoklady jsem aplikoval na hodnotách z V-A charakteristik fotovoltaických článků naměřených na systému Pasan II.

Výsledky z předchozí kapitoly ukázaly, že zjednodušením matematického modelu pro určení parazitních odporů se dopouštíme chyby menší než setiny procenta pro sériový odpor R_s . Tato chyba je menší než běžná přesnost měřících přístrojů. Pro paralelní odpor R_{sh} je sice relativní chyba větší jak 6 %, ale stále je to chyba tolerovatelná. Takováto chyba určení paralelního odporu se na V-A charakteristice fotovoltaického článku projeví jen velmi málo. Rozdíl v hodnotách sériového odporu R_s zjištěných pomocí různých metod přisuzuji různým polohám bodů určení odporů. Jeden bod má souřadnice $U = U_{oc}$, $I = 0$ a druhý leží v blízkosti bodu maximálního výkonu.

Téma vyhodnocování V-A charakteristik fotovoltaických článků je velmi zajímavé, i když občas matematicky obtížné. Myslím, že další práce v tomto směru mohou pomoci k posunu technologie obnovitelné energie ze slunce k lepším výsledkům. Doufám, že závěry mnou předložené budou dále k užítku.

Literatura

- [1] *Edited by A. Luque and S. Hegedus: Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* John Wiley & Sons, Ltd. Chichester, England, 2003.
ISBN 0-471-49196-9
- [2] *M. Libra, V. Poulek: Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny solární energie SVĚTLO*, FCC Public s. r. o., ročník 6, číslo 1/2005, str. 32-36
- [3] *ČEZ s.r.o: Fotovoltaika* Dostupné z
<<http://www.cez.cz/cs/energie-a-zivotni-prostredi/energie-z-obnovitelnych-zdroju/slunce.html>>
Platné v červnu 2009.
- [4] *Wikipedia: Solar cell* Dostupné z <http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell>
Platné v červnu 2009.
- [5] *M. Libra, V. Poulek: Fyzikální podstata fotovoltaické přeměny solární energie SVĚTLO*, FCC Public s. r. o., ročník 6, číslo 1/2005, str. 32-36

- [6] *J. Cabestany and L. Castañer: A simple solar cell series resistance measurement method* Revue Phys. Appl. 18 (1983) 565-567
- [7] *M. Sabry and Ahmed E. Ghitas: Influence of Temperature on Methods for Determining Silicon Solar Cell Series Resistance* Journal of Solar Energy Engineering, ASME, Vol. 129, August 2007, page 331-335
- [8] *MARTIN WOLF and HANS RAUSCHENBACHT: SERIES RESISTANCE EFFECTS ON SOLAR CELL MEASUREMENTS* Advanced Energy Conversion. Vol. 3, pp. 455-479. Pergamon Press, 1963. Printed in Great Britain
- [9] *Dezso Séra: Real-time modelling, Diagnostics and Optimised MPPT for Residential PV systems* Aalborg University Institute of Energy Technology, Denmark, January 2009
- [10] *Kasturi Lal Chopra and Suhit Ranjan Das: Thin Film Solar Cells* Plenum Press. New York, USA, 1983.
ISBN 0-306-41141-5
- [11] **Přednášky z předmětu Fyzika 1** , Fakulta elektrotechnická, ČVUT, 2007
- [12] *Pasan SA: CELL TESTER IIc - Operating manual* , version 3.0, 2005
- [13] *Christian Honsberg and Stuart Bowden: Photovoltaics CDROM*
Dostupné z <<http://pvcdrom.pveducation.org/index.html>>
Platné v červnu 2009.

- [14] *REUK.co.uk: DIY Solar Panel Kits* Dostupné z <<http://www.reuk.co.uk/OtherImages/solar-cell-in-panel-kit.jpg>>
Platné v červnu 2009.
- [15] *Ing. Petr Bannert: Charakteristické odpory fotovoltaických článků* Dostupné z <<http://www.vosvdf.cz/cmsb/index.php?p=1321>>
Platné v červnu 2009.
- [16] *Ing. Petr Bannert: Matematický model VAchar fotovoltaického článku* Dostupné z <<http://www.vosvdf.cz/cmsb/index.php?p=1321>>
Platné v červnu 2009.
- [17] ČSN EN 60904-1 (364604): *Fotovoltaické součástky. Část 1: Měření fotovoltaických voltampérových charakteristik.*
Praha : Český normalizační institut, 1996. Datum účinnosti 1.1.1996.
Rozsah 8 stran.
- [18] ČSN EN 60904-1 ed. 2 (364604): *Fotovoltaické součástky. Část 1: Měření fotovoltaických voltampérových charakteristik.*
Praha : Český normalizační institut, 2007. Datum účinnosti 1.7.2007.
Rozsah 32 stran.
- [19] ČSN EN 60904-3 (364604): *Fotovoltaické součástky. Část 3: Zásady měření pro fotovoltaické (FV) solární součástky pro pozemní použití, včetně referenčních údajů o spektrálním rozložení ozařování.*
Praha : Český normalizační institut, 1996. Datum účinnosti 1.2.1996.
Rozsah 16 stran.

- [20] ČSN EN 60904-3 ed. 2 (364604): *Fotovoltaické součástky. Část 3: Zásady měření pro fotovoltaické (FV) solární součástky pro pozemní použití, včetně referenčních údajů o spektrálním rozložení ozařování.*
Praha : Český normalizační institut, 2008. Datum účinnosti 1.1.2009.
Rozsah 40 stran.
- [21] ČSN EN 60904-9 (364604): *Charakteristické parametry samostatných fotovoltaických (FV) systémů.*
Praha : Český normalizační institut, 1999. Datum účinnosti 1.4.1999.
Rozsah 16 stran.
- [22] ČSN EN 61194 (364620): *Fotovoltaické součástky. Část 1: Měření fotovoltaických voltampérových charakteristik.*
Praha : Český normalizační institut, 1996. Datum účinnosti 1.1.1996.
Rozsah 8 stran.
- [23] ČSN EN 61277 (364620) *Pozemní fotovoltaické (FV) systémy vyrábějící energii - Všeobecně a návod.*
Praha : Český normalizační institut, 1999. Datum účinnosti 1.7.1999.
Rozsah 2 strany.
- [24] ČSN EN 61829 (364630): *Pole fotovoltaických (FV) modulů z krystalického křemíku - Měření voltampérových charakteristik v zapnutém stavu.*
Praha : Český normalizační institut, 1999. Datum účinnosti 1.7.1999.
Rozsah 4 strany.
- [25] ČSN EN 50461 (364636): *Solární články - Katalogové údaje a údaje o produktu pro solární články z krystalického křemíku.*
Praha : Český normalizační institut, 2007. Datum účinnosti 1.2.2007.
Rozsah 12 stran.

Přílohy

Obsah přiloženého CD

- Bakalářská práce v elektronické formě (.pdf)
- Naměřené hodnoty, grafy naměřených hodnot (.pdf, .txt)
- Pasan IId : Operation Manual version 1.0 (.pdf)

Tato práce byla zpracována systémem L^AT_EX v textovém editoru TextMate na platformě Mac OS X