

**CREȘTEREA EFICIENȚEI
SISTEMELOR FOTOVOLTAICE
AUTONOME PRIN DIMINUAREA
TEMPERATURII CELULELOR
FOTOVOLTAICE**

Alboteanu Ionel Laurentiu
*Universitatea din Craiova, Facultatea
de inginerie
electrică, Craiova, ROMANIA*

**INCREASE EFFICIENCY OF
STAND ALONE PHOTOVOLTAIC
SYSTEMS BY REDUCING
TEMPERATURE OF CELLS**

Alboteanu Ionel Laurentiu
*University of Craiova, Faculty of
Electrical Engineering, Craiova,
ROMANIA*

REZUMAT

Modulele fotovoltaice au tipic o eficiență de conversie solară de până la 16%. Restul de energie produsă este în cea mai mare parte căldură, care nu este nici captată, nici utilizată. Acest lucru înseamnă că, de fapt, modulele fotovoltaice generează de 2-4 ori mai mult energie termică decât energie electrică. Această căldură degajată crește temperatura de funcționare a modulelor fotovoltaice, ceea ce de fapt scade performanța lor de funcționare - uneori, foarte semnificativ în cazul celulelor din siliciu cristalin. Pentru a diminua acest fenomen se poate aplica pe spatele panoului un radiator, care prin conducție termică preia căldura pentru a o disipa mediului ambiant sau prin montarea unui sistem de răcire cu apa, contribuie la preîncălzirea sau chiar furnizarea apei calde menajere. Lucrarea prezintă aspecte teoretice și practice privind îmbunătățirea performanțelor energetice ale sistemelor fotovoltaice autonome prin utilizarea unui sistem de răcire aplicat modulelor fotovoltaice.

CUVINTE CHEIE: celule fotovoltaice, eficiență energetică, temperatură, sistem de răcire.

1. INTRODUCERE

În prezent siliciul cristalin oferă un randament de 15-16%, iar anumite studii consideră că limitele lui ar fi atins aproximativ 25%, în condiții de laborator. Deși alte materiale, cum ar fi Galiul, oferă un randament de 30%, prețul prohibitiv le face potrivite doar pentru explorări spațiale. În ultima perioadă cercetătorii universităților

ABSTRACT

Photovoltaic modules typically have solar conversion efficiency by 16%. The rest of energy is mostly heat, which is neither captured nor used. This means that, in fact, photovoltaic modules generate 2-4 times more heat than electricity. This heat increases the operating temperature of photovoltaic modules, which actually lowers their operating performance - sometimes very significantly (crystalline silicon).

To diminish this phenomenon can be applied an radiator on the back of the panel, which by heat conduction takes it dissipate heat to the environment or by installing a water cooling system, or even contribute to preheat domestic hot water supply.

This paper presents theoretical and practical aspects concerning improving the energy performance of autonomous photovoltaic systems by using a cooling system applied to photovoltaic modules.

KEY WORDS: photovoltaic cells, energy efficiency, temperature, cooling system.

1. INTRODUCTION

Crystalline silicon currently offers a yield of 15-16% and some studies consider that its limits would be reached approximately 25% under laboratory conditions. Although other materials such as Ga, offering a yield of 30%, prohibitive price makes them suitable only for space applications. Recently, researchers of U.S. universities have announced that was obtained a photocell with a yield of 60%. It's a big step towards the upper limits of efficiency photovoltaic cells. Very complex technology and materials used do remain only

americane au anunțat obținerea unei fotocelule cu un randament de 60%. E un pas mare către limitele superioare ale randamentului celulelor fotovoltaice. Tehnologia foarte complexă și materialele folosite o fac să rămână doar la stadiul de laborator. De aceea, în următorul deceniu, nimic nu pare să amenințe supremația siliciului. În ultima vreme tot mai multe firme au reușit să mărească randamentul oferit de celulele solare pe baza de siliciu. În martie 2003, BP Solar a anunțat o eficiență de 18,3%, în timp ce Sanyo a scos deja pe piață o celulă cu o eficiență de 19,5%.

Supraîncălzirea unui modul fotovoltaic scade performanța generării de energie electrică cu 0,4-0,5% pentru fiecare 1° C, peste temperatura sa nominală (care, în cele mai multe cazuri este de 25° C). Acesta este motivul pentru care conceptul de "răcire a fotovoltaicelor" a devenit atât de important.

2. INFLUENȚA TEMPERATURII ASUPRA PERFORMANTELOR MODULELOR FOTOVOLTAICE

Pentru studiul influenței temperaturii asupra performanțelor modulelor fotovoltaice se apelează la modele matematice ce descriu comportarea modulelor fotovoltaice.

Rezultatele obținute de Walker de la Universitatea Queensland, Austria, utilizând modelul electric cu complexitate medie, prezentat în figura 1 au arătat o bună acuratețe a modelului [3]. Pentru a avea o specificație clară a elementelor (celule sau module) parametrii în modelul matematic sunt notați astfel: cu "M" indice sus, cei care se referă la module; cu "C" cei care se referă la celule PV, [1]. Astfel tensiunea la bornele unui modul se notează cu U^M , în timp ce curentul total generat de modul se notează cu I^M .

Modelul constă dintr-o sursă de curent (I_{sc}^M), o diodă (D), și o rezistență serie (R_s^M). Efectul rezistenței paralele, (R_p) este foarte scăzut la un singur modul PV, de aceea acest

the state of laboratory. Therefore, in the next decade, nothing seems to threaten the supremacy of silicon. Recently more and more companies have been able to increase the yield offered by solar cells based on silicon. In March 2003, BP Solar announced an efficiency of 18.3%, while Sanyo has already put on the market a cell with an efficiency of 19.5%.

Overheating of a PV module decreases performance of output power by 0.4-0.5% per 1°C over its rated temperature (which in most cases is 25 degrees C). This is why the concept of "cooling of PV" has become so important.

2. EFFECT OF TEMPERATURE ON PHOTOVOLTAIC MODULES PERFORMANCES

To study the influence of temperature on the performance of photovoltaic modules it resort to mathematical models that describe the behavior of PV modules.

The results obtained by Walker at Queensland University, Austria, using electric medium complexity model presented in figure 1 showed good accuracy of the model [3].

To have a clear specification of elements (cells or modules) parameters in the mathematical model are ranked as follows: those that refer to modules, with "M" show up, those that relate to PV cells, with "C", [1]. Thus, the voltage across a module is denoted by U^M , while the total current generated by the module is denoted by I^M .

The model consists of a current source (I_{sc}^M), a diode (D), and a series resistance (R_s^M). The effect of parallel resistance (R_p) is very low with a single PV module, so this model does not include the resistance. The model is also included to improve the effect of temperature on the short circuit current (I_{sc}^M) and the reverse current blocking diode (I_0). It uses a single diode with ideality factor (n) obtained from the best curve of the I-V characteristics.

model nu include această rezistență. De asemenea pentru îmbunătățirea modelului este inclus efectul temperaturii asupra curentului de scurtcircuit, (I_{sc}^M) și curentul invers de blocare al diodei (I_0). Se utilizează o singură diodă cu factorul de idealitate (n) obținut din cea mai bună curbă a caracteristicilor U-I.

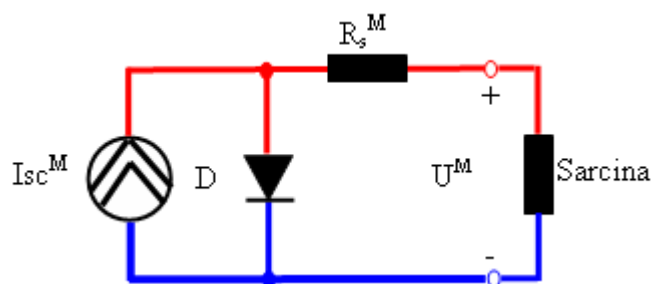


Figura 1. Circuitul echivalent al modulului PV
Figure 1. Equivalent circuit of PV module

Curentul furnizat de un modul, I^M , în condiții de operare arbitrare poate fi descris astfel de ecuația:

$$I_M = I_{sc}^M \left(1 - e^{-\frac{U^M - U_{oc}^M + R_s^M \cdot I^M}{N_{SM} U_t^C}} \right) \quad (1)$$

Expresia (1) este o funcție implicită dependentă de:

- Curentul de scurtcircuit al modulului:

$$I_{sc}^M = N_{PM} \cdot I_{sc}^C \quad (2)$$

- Tensiunea în circuit deschis a modulului:

$$U_{oc}^M = N_{SM} \cdot U_{oc}^C \quad (3)$$

- Rezistența serie echivalentă a modulelor:

$$R_s^M = \frac{N_{SM}}{N_{PM}} \cdot R_s^C \quad (4)$$

- Tensiunea termică:

$$U_t^C = \frac{nkT^C}{e} \quad (5)$$

Curentul de scurtcircuit al celulei se exprimă ca o dependență liniară de radiația solară G_a :

$$I_{sc}^C = C_1 \cdot G_a \quad (6)$$

Current supplied by a module, I^M , for operating conditions can be described as arbitrary by the equation:

$$I_M = I_{sc}^M \left(1 - e^{-\frac{U^M - U_{oc}^M + R_s^M \cdot I^M}{N_{SM} U_t^C}} \right) \quad (1)$$

Expression (1) is a default function depends on:

- Short-circuit current of the module:

$$I_{sc}^M = N_{PM} \cdot I_{sc}^C \quad (2)$$

- Open circuit voltage of the module:

$$U_{oc}^M = N_{SM} \cdot U_{oc}^C \quad (3)$$

- Equivalent series resistance of the modules:

$$R_s^M = \frac{N_{SM}}{N_{PM}} \cdot R_s^C \quad (4)$$

- Thermal voltage:

$$U_t^C = \frac{nkT^C}{e} \quad (5)$$

Cell short circuit current can be expressed as a linear function with solar radiation, G_a :

$$I_{sc}^C = C_1 \cdot G_a \quad (6)$$

Temperature T of the cell depends solely on

Temperatura de lucru a celulei T^C depinde exclusiv de radiație, G_a și de temperatura ambiantă, T_a în concordanță cu relația empirică:

$$T^C = T_a + C_2 \cdot G_a \quad (7)$$

unde: constanta C_2 se exprimă astfel:

$$C_2 = \frac{T_{ref}^C - T_{a,ref}}{G_{a,ref}} \quad (8)$$

Tensiunea de mers în gol a celulei variază invers proporțional cu temperatura celulei conform relației:

$$U_{oc}^C = V_{oc,0}^C + C_3 (T^C - T_0^C) \quad (9)$$

unde: constanta C_3 este de regulă:

$$C_3 = -2,3mV / C$$

Curbele caracteristice I-U ale modulului PV variază cu radiația solară G , [W/m²] și temperatura joncțiunii T_c [°C]. Deci, valorile parametrilor U_{oc}^M , I_{sc}^M , și P_{max}^M în orice combinație cu G și T^C sunt necesare pentru analizarea comportării sistemului. Parametri modelului pentru condițiile standard sunt cunoscute din datele de catalog ale modulului PV. Trebuie calculați acești parametri în combinație cu G și T^C . Temperatura joncțiunii T^C care este raportată la temperatura mediului ambiant T_a printr-o dependență liniară.

Temperatura este un parametru important, deoarece celulele sunt expuse radiației solare, fiind posibilă încălzirea lor. În plus, o parte din energia absorbită nu este convertită în energie electrică: se disipă sub formă de căldură [2],[4],[5],[6]. Din aceste motive, temperatura celulelor este întotdeauna mai ridicată decât a mediului ambiant.

Figura 2 prezintă graficele caracteristicilor U-I ale modului PV USP 145 la diferite valori de temperatură simulate cu modelul MATLAB, iar figura 3 prezintă graficele randamentului modulului, realizate cu programul specializat PVSYS.

G_a radiation, and T_a ambient temperature according to the empirical relationship:

$$T^C = T_a + C_2 \cdot G_a \quad (7)$$

where: constant C_2 is expressed as follows:

$$C_2 = \frac{T_{ref}^C - T_{a,ref}}{G_{a,ref}} \quad (8)$$

Open circuit voltage of the cell varies inversely with cell temperature according to the relation:

$$U_{oc}^C = V_{oc,0}^C + C_3 (T^C - T_0^C) \quad (9)$$

where: constant C_3 is usually:

$$C_3 = -2,3mV / C$$

VI characteristic curves of PV module solar radiation vary with G , [W/m²] and junction temperature T^C [°C]. So, U_{oc}^M , I_{sc}^M and P_{max}^M parameter values, in any combination with G and T^C are required to analyze system behaviour. Model parameters for STC are known from the datasheet of PV module. These parameters in combination with G and T^C , must calculate. The T^C , junction temperature is reported to T_a , ambient temperature by linearity.

Temperature is an important parameter, because the cells are exposed to solar radiation, is possible to heat them. In addition, some of the energy absorbed is converted to electricity: it dissipates as heat [2],[4],[5],[6]. For these reasons, cell temperature is always higher than ambient.

Figure 2 presents I-V characteristics graphs of USP 145 PV module at different temperature values simulated by MATLAB, and Figure 3 shows the graphics of module efficiency made with PVSYS specialized program.

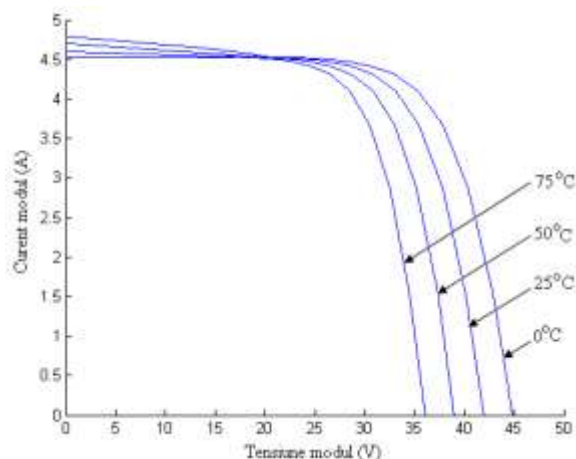


Figura 2. Curbele U-I ale modului USP 145 la diferite temperaturi ($1000\text{W}/\text{m}^2$)
 Figure 2. I-V curves of USP 145 PV module at different temperature ($1000\text{W}/\text{m}^2$)

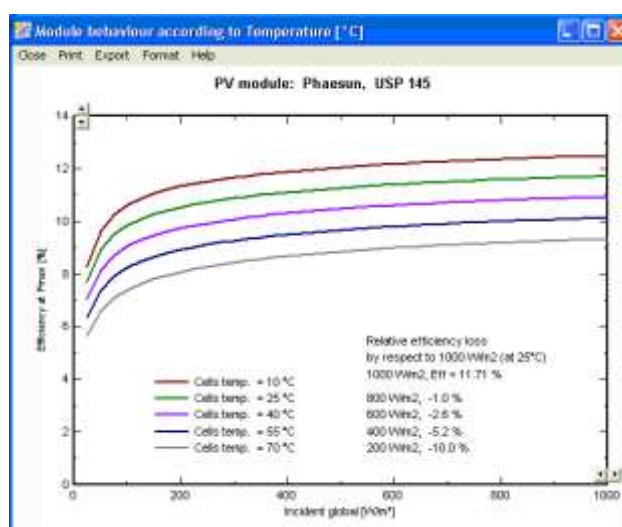


Figura 3. Randamentul modului PV în funcție de temperatură
 Figure 3. PV module efficiency for different temperatures

3. REALIZAREA SISTEMULUI DE RĂCIRE PENTRU PANOU FOTOVOLTAIC

În timpul funcționării temperatura celulelor PV depășește 30°C , ajungând vara în dese cazuri la peste 60°C . La aceste valori ale temperaturii se observă o diminuare semnificativă a puterii panourilor fotovoltaice. Pentru a diminua acest fenomen se poate aplica pe spatele panoului un radiator, care prin conducție termică preia căldura celulelor PV și o transferă mediului ambiant [4]. O altă modalitate constă în realizarea unui sistem de răcire cu apă, plasat

3. ACHIEVEMENT OF COOLING SYSTEM FOR PHOTOVOLTAIC PANEL

PV cell temperature during operation exceeds 30°C , bringing summer in frequent cases over 60°C . At these values of temperature shows a significant reduction of power photovoltaic panels. To diminish this phenomenon can be applied an radiator on the back of the panel, which by heat conduction takes it dissipate heat to the environment [4]. Another way is to achieve a water cooling system, placed on the back of PV. Hot water resulting from cooling system

pe spatele panoului PV. Apa caldă rezultată de la sistemul de răcire se poate utiliza în scopuri menajere, sau ca agent de preîncălzire în instalațiile termice.

În figura 4 este prezentat sistemul de răcire realizat, pentru panoul PV tip USP 145.

can be used for household or as agent for preheating the thermal plants.

In Figure 4 is shown the cooling system developed for PV panel type USP 145.



Figura 4. Sistemul de răcire pentru panoul PV

Figure 4. Water cooling system of PV panel

Acest sistem de răcire este alcătuit dintr-o placă de metal (1) cu conductibilitate termică foarte bună, pe care este atașată o serpentină (2) prin care circulă apa. Fixarea serpentinei pe placa absorbantă s-a realizat prin presare. Asigurarea unui contact termic bun între cele două componente s-a realizat prin introducerea unei vaseline siliconice între acestea.

Pompa (3) care asigură circulația apei poate fi comandată de un microcontroler ce culege informații privind temperatura panoului prin 2 senzori montați pe acesta. Astfel debitul pompei poate fi reglat permanent asigurând o răcire eficientă a panoului, implicit menținerea unui randament cât mai ridicat cu un consum minim de energie.

The cooling system consists of a metal plate (1) with very good thermal conductivity, which is attached to a serpentine (2) by circulating water. Fixing of the serpentine to the absorbing plate was made by pressing. Ensure good thermal contact between the two components was achieved by introducing a silicone grease between them.

The pump (3) which provides water circulation can be controlled by a microcontroller which collect information on the two temperature sensors mounted on panel. Thus, the pump flow can be adjusted continuously providing efficient cooling of the panel thus maintaining the highest possible yield with minimum energy consumption.

4. EXPERIMENTALE

REZULTATE

4. EXPERIMENTAL RESULTS

PV system experimentation was made inside

Experimentarea instalației solare s-a făcut în incinta facultăților cu profil electric din cadrul Universității din Craiova, în luna iunie 2011.

Elementele componente ale instalației experimentate sunt prezentate în figura 5. Instalația are în componență următoarele elemente: un sistem de orientare pseudo-ecuatorial pentru orientarea unui panou PV; 2 panouri fotovoltaice USP, 150W (1), (2); piranometrul pentru măsurarea radiației solare (8); 2 baterii de acumulare, fiecare având tensiunea de 12 volți și capacitatea de 44Ah (3); reglatoare de încărcare a bateriilor (4); invertor 1200W (5); sistem de dezvoltare cu microcontroler (6); senzori de temperatură; traductoare LEM de curent și tensiune laptop (7).

the electric faculties of the University of Craiova, in June 2011.

Components of the experimental installation is shown in Figure 5. The installation consists of the following: pseudo-ecuatorial tracking system for a PV panel; two PV panels type USP 150W (1), (2); pyranometer for solar radiation measured (8); two batteries, voltage of 12V each with the capacity of 44Ah (3); controllers for batteries charges (4); inverter, 1200W (5); development system with microcontroller (6); temperature sensors; LEM current and voltage transducers, laptop (7).



Figura 5 Elementele componente ale instalației solare

Figure 5. PV system components

Programul instalat pe laptop permite achiziția datelor de la sistemul PV și afișarea lor în timp real, sub formă grafică și numerică.

În figura 6 este prezentată fereastra de afișare numerică a parametrilor sistemului PV. Sunt afișați următorii parametri.

- curentul de încărcare al panoului

Installed on the laptop program allows data acquisition from the PV system and displaying real-time graphical and numerical form.

In Figure 6 is presented numeric display window PV system parameters. Following parameters are displayed.

- cu orientare după două axe- I1;
 - curentul de încărcare al panoului cu orientare după o axa prevazut cu sistemul de răcire – I2;
 - curentul absorbit de consumatori – I3;
 - tensiunea la bornele unei baterii – U;
 - radiația solară – Rad;
 - temperatura mediului ambiant – Temp1;
 - temperatura panoului PV – Temp2, etc.
- the charging current of the panel after two axes orientation - I1;
 - the charging current of the panel after an axis orientation, provided with cooling system – I2;
 - the current absorbed by consumers – I3;
 - the voltage across a battery– U;
 - the solar radiation – Rad;
 - the ambient temperature – Temp1;
 - the PV panel temperature – Temp2, etc.

În momentul inițial (fig.6), pompa sistemului de răcire pentru panoul PV este deconectată, iar temperatura ambiantă este de 32°C și cea a panoului de 53 °C.

At baseline (fig. 6), the cooling system pump PV panel is disconnected and the ambient temperature is 32 °C and 53 °C panel.

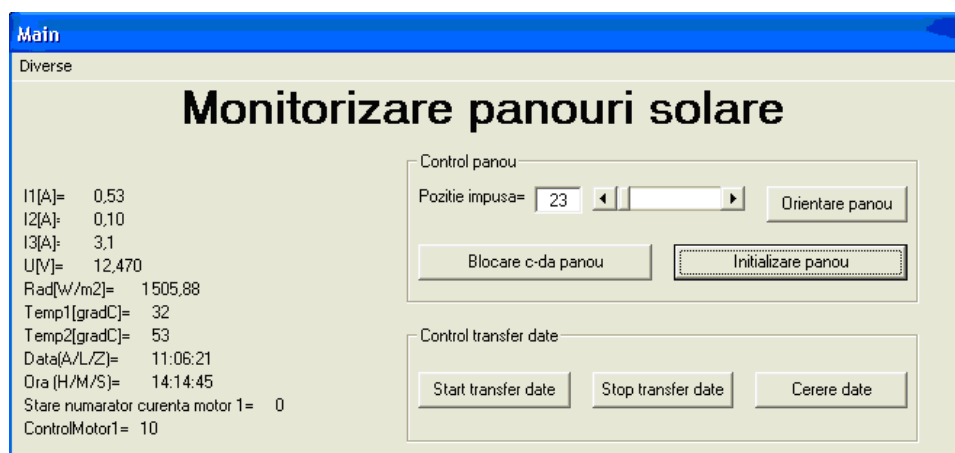


Figura 6 Fereastra de afișare a parametrilor sistemului PV cu sistemul de răcire al panoului nefuncțional

Figure 6 Window display of PV system parameters panel with cooling system not working

După o perioadă de timp (fig. 7) s-a conectat pompa care asigură circulația apei prin serpentina de răcire a panoului PV. La conectarea acesteia în momentul imediat următor s-a observat o scădere a temperaturii panoului PV. În figura 7 se poate observa clar acest fenomen, temperatura ambiantă fiind de 29°C pe când temperatura panoului a scăzut la 40°C.

After a period of time (Fig. 7) the pump, to provide water circulation by PV panel cooling serpentine, is connected. In this connection the very next moment there was a decrease in PV panel temperature. In Figure 7 we can see clearly this phenomenon, the ambient temperature of 29 °C on the panel temperature dropped to 40 °C.

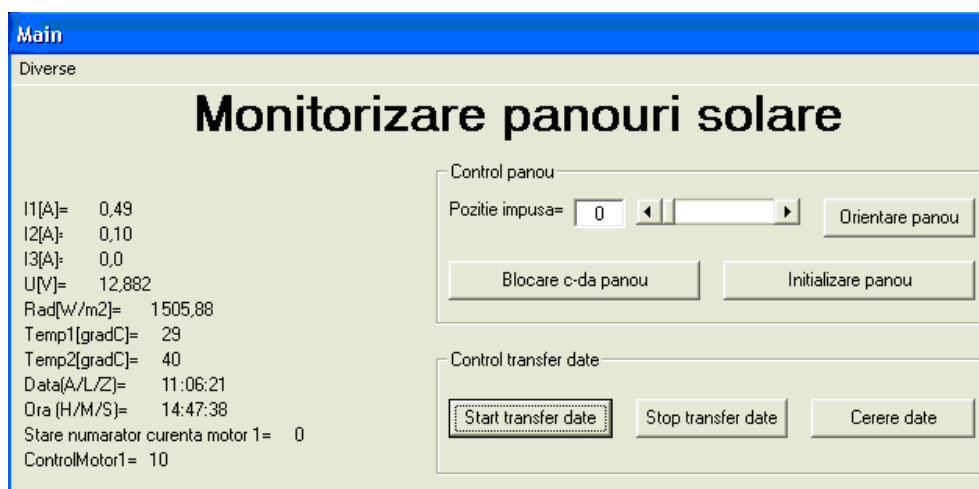


Figura 7 Ferestrele de afișare a parametrilor sistemului PV cu sistemul de răcire al panoului în funcțiune

Figure 7 Window display of PV system parameters panel with cooling system working

De asemenea s-a observat o creștere a temperaturii apei de răcire la ieșirea din serpentina sistemului de răcire a panoului.

Also, it observed an increase in cooling water temperature at the outlet of the cooling serpentine of the panel.

4. CONCLUZII

4. CONCLUSIONS

Din analiza modelelor matematice, a graficelor obținute prin simulare și a rezultatelor experimentale se observă influența temperaturii asupra performanțelor modului PV din siliciu monocristalin, USP 145.

The analysis of mathematical models, graphs obtained by simulation and experimental results shows the influence of temperature on monocrystalline silicon PV module performance, USP 145.

Rezultatele experimentale evidențiază pe de o parte buna funcționare a sistemului PV, iar pe de altă parte, corectitudinea și eficiența sistemului de răcire realizat pentru panoul fotovoltaic și poate fi aplicat cu succes în instalațiile solare pentru aplicații domestice

The experimental results show the good side of a PV system operation and on the other hand, accuracy and efficiency of the cooling system designed for photovoltaic panel and can be applied successfully in domestic solar applications

Mulțumiri

Această lucrare a fost finanțată din contractul POSDRU/89/1.5/S/61968, proiect strategic ID 61968 (2009), cofinanțat din Fondul Social European, prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013.

Acknowledgment

This work was supported by the strategic grant POSDRU/89/1.5/S/61968, Project ID 61968 (2009), co-financed by the European Social Fund, within the Sectorial Operational Programme Human Resources Development 2007-2013.

BIBLIOGRAFIE

REFERENCES

[1] Alboteanu L. Ivanov S., Manolea Gh., *Modelling and simulation of a stand-alone*

[1] Alboteanu L. Ivanov S., Manolea Gh., *Modelling and simulation of a stand-alone*

photovoltaic system, Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Power Systems, Santander, Spain, 2008, pp.189-193, ISBN 978-960-373-006-2.

[2] Alboteanu L., *Monitoring temperature of photovoltaic modules*, Annals of the Constantin Brancusi University of Targu Jiu, Engineering Series, 2010.

[3] Baruch P., *A two level system as a model for photovoltaic solar cell*, Journal Appl. Physic, 1984.

[4] Huang B. J., Lin T. H., Hung W. C., SUN S., *Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems*, Solar Energy Vol. 70, No. 5, pp. 443–448, 2001.

[5] Sobor I., Caraghiaur Diana, Nosadze Ș., ș.a., *Surse regenerabile de energie*, Ed. Tehnica-Info Chișinău, 2006, ISBN, 978-9974-34-020-1.

[6] Zondag H. A., De Vries D., Van Helden W. G., Van Zolingen R. J. C., *The thermal and electrical yield of a pv-thermal collector*, Solar Energy Vol. 72, No. 2, pp. 113–128, 2002.

photovoltaic system, Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Power Systems, Santander, Spain, 2008, pp.189-193, ISBN 978-960-373-006-2.

[2] Alboteanu L., *Monitoring temperature of photovoltaic modules*, Annals of the Constantin Brancusi University of Targu Jiu, Engineering Series, 2010.

[3] Baruch P., *A two level system as a model for photovoltaic solar cell*, Journal Appl. Physic, 1984.

[4] Huang B. J., Lin T. H., Hung W. C., SUN S., *Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems*, Solar Energy Vol. 70, No. 5, pp. 443–448, 2001.

[5] Sobor I., Caraghiaur Diana, Nosadze Ș., ș.a., *Surse regenerabile de energie*, Ed. Tehnica-Info Chișinău, 2006, ISBN, 978-9974-34-020-1.

[6] Zondag H. A., De Vries D., Van Helden W. G., Van Zolingen R. J. C., *The thermal and electrical yield of a pv-thermal collector*, Solar Energy Vol. 72, No. 2, pp. 113–128, 2002.