

## Metoda de modelare a funcționării celulelor fotovoltaice exploatare în condiții naturale

Grigoriu Mircea<sup>1</sup>, Preda Liliana<sup>1</sup>, Dinu Doina<sup>1</sup>,  
Popescu Cristinel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> University POLITEHNICA of Bucharest, 313  
Spl.Independentei, district 6, Bucuresti, CP  
060042

<sup>2</sup>Universitatea Constantin Brancusi, Targu Jiu  
Eroilor, nr.30

grigoriu.mircea@gmail.com,  
lilianapreda@yahoo.com,  
dinudoinacor@yahoo.com  
cristi67pop@yahoo.com

### Rezumat.

Lucrarea propune o metodologie de evaluare a eficienței celulelor fotovoltaice, care conduce la evaluarea eficienței întregului sistem, ținând seama de influența factorilor de mediu asupra capacității de transformare a energiei radiante în energie electrică. Pe baza cercetărilor în laboratoarele Universității Politehnica București, s-a ajuns la estimarea unor funcții de dependența a randamentului unor tipuri date de celule fotovoltaice față de temperatura de suprafața celulelor. Noutatea adusă de aceste cercetări constă în evaluarea analitică a acestor corelații, prin aproximarea valorilor măsurate prin metoda celor mai mici pătrate. În urma verificărilor pe diferite standuri de încercare și în diferite condiții de exploatare, se constată unele diferențe între coeficienții polinoamelor de aproximare realizate pentru aceeași celulă fotovoltaică, dar abaterile de aplicare a fiecărui polinom sunt comparabile, indiferent de condițiile concrete.

### 1.INTRODUCERE

Sistemele fotovoltaice au evoluat în ultimii ani de la faza de proiecte pilot, către sisteme de putere considerabilă sub forma unor câmpuri fotovoltaice, concurând deja fermele eoliene. Aplicațiile de mică putere există în continuare și se extind, dar dinamica sistemelor de putere mare este mult superioară. Întrucât puterea electrică furnizată de celulele fotovoltaice individuale este redusă, exploatarea lor individuală este limitată la aplicații singulare [1], [3].

## Modeling methods of photovoltaic cells exploit natural conditions

Grigoriu Mircea<sup>1</sup>, Preda Liliana<sup>1</sup>, Dinu Doina<sup>1</sup>,  
Popescu Cristinel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> University POLITEHNICA of Bucharest, 313  
Spl.Independentei, district 6, Bucuresti, CP  
060042

<sup>2</sup>Universitatea Constantin Brancusi, Targu Jiu  
Eroilor, nr. 30

grigoriu.mircea@gmail.com,  
lilianapreda@yahoo.com,  
dinudoinacor@yahoo.com  
cristi67pop@yahoo.com

### Abstract.

The paper proposes a methodology for evaluating the effectiveness of photovoltaic cells that leads to evaluation of the effectiveness of the whole system, taking into account the influence of environmental factors on the ability to transform radiant energy into electricity.

Based on research in the laboratories of the University Politehnica Bucharest, it was estimating yield dependence functions of given types of photovoltaic cells to the cell surface temperature. The scientific contribution of this research is the evaluation of these correlations analytically by approximating the values measured by the method of least squares.

### 1.INTRODUCTION

Photovoltaic systems have evolved in recent years from pilot phase, to considerable power systems in the form of photovoltaic fields, already competing farms. Low-power applications is still expanding, but the dynamics of large power systems is far superior. Since electric power is supplied by individual photovoltaic cells reduced their individual operation is limited to single applications [1], [3].

An efficient way of photovoltaic systems is very accurate assessment of actual use efficiencies under natural conditions of use.

At present, the efficiency of photovoltaic systems is currently determined by a wide margin approximation, more than acceptable with practical applicability extension systems.

Tendința de dezvoltare rapidă a sistemelor fotovoltaice este încurajată și de către organismele guvernamentale și a sistemelor economice și politice internaționale și naționale, prin programe de finanțare preferențiale sau prin alte proceduri, ceea ce a condus la neglijarea aspectelor economice și de eficiență a investițiilor în exploatare, încurajându-se evoluțiile rapide tehnologice [3].

Preocuparea în domeniul eficienței sistemelor fotovoltaice se accentuează în prezent ca urmare a extinderii lor pentru producerea energiei electrice la scară industrială.

O modalitate de eficientizare a sistemelor fotovoltaice este tocmai evaluarea corectă a randamentelor reale de utilizare în condiții naturale de exploatare.

În prezent, eficiența sistemelor fotovoltaice este stabilită în prezent cu o largă marjă de aproximare, tot mai puțin acceptabilă odată cu extinderea aplicabilității practice a sistemelor.

Procedeu propus în lucrarea prezentă se bazează pe observația, cunoscută din literatura de specialitate, că eficiența exploatării celulelor fotovoltaice este determinată semnificativ de temperatura celulei. Cu cât celula se încălzește, dintr-o cauză oarecare, randamentul se reduce. În urma cercetărilor efectuate în cadrul lucrării, s-a confirmat o ipoteză evidentă, anume că deplasarea curenților naturali de aer au ca efect răcirea celulelor fotovoltaice, deci produc o creștere a eficienței exploatării acestora de care nu se ține seama în prezent.

## **2.METODA DE ESTIMARE A RANDAMENTULUI UNEI CELULE FOTOVOLTAICE ÎN FUNCȚIE DE TEMPERATURA DE LUCRU**

### *2.1.Descrierea ipotezelor adoptate pentru modelarea funcționării unei celule fotovoltaice*

Metoda propusă pentru estimarea randamentului de exploatare în condiții naturale a celulelor fotovoltaice este bazată pe un model matematic efectiv al funcționării celulei, model care leagă parametrii constructivi și funcționali ai celulei de parametrii mediului în care este exploatată celula [1].

The current calculation operation efficiency photovoltaic cells ignore the cooling effect exerted by random environmental factors, among which the most important is natural current of air, wind, manifested even more strongly, as the application is made in an isolated place, away from buildings or whole cities that reduce air speed. Typically, the systems function in free atmosphere, so the influence of weather conditions is especially important.

The method proposed in this paper is based on the observation, known in the literature, the efficient operation of photovoltaic cells correlates with cell temperature. The cell is heated, from any cause, the yield is reduced. Following research in the paper, evident hypothesis was confirmed, namely that the natural movement of air currents have the effect of cooling of photovoltaic cells, thus producing an increase in the efficiency of their operation which are currently not taken into account.

## **2.A METHOD OF ENERGY EFFICIENCY ESTIMATION FOR PHOTOVOLTAICS CELLS WITH TEMPERATURE**

### *2.1. Description assumptions adopted for modeling the operation of a photovoltaic cell*

The proposed method for estimating the operating efficiency of photovoltaic cells under natural conditions is actually based on a mathematical model of cell operation model linking structural and functional parameters of cell parameters is exploited cell environment [1].

Mathematic model of cell operation is achieved by testing laboratory cell analyzed under standard conditions, measuring the effective power of radiation that reaches the cell surface.

It concludes that the most important function that models the operation of a particular type of photovoltaic cell is temperature dependent efficiency of cell surface  $\eta = f(t^0)$  [4].

In practice, photovoltaic cells work most of the time in much smaller areas and a detailed analysis of the temperature dependence of yield usual operating areas show a close

representation of a curve of the second degree, than that of the first degree.

Modelul metematic al funcționării celulei se obține prin încercarea în laborator a celulei analizate, în condiții standard, măsurând puterea efectivă a radiației care ajunge la suprafața celulei, puterea electrică furnizată de celulă, temperatura la suprafața celulei.

Se concluzionează că funcția cea mai importantă care modelează funcționarea unui anumit tip de celulă fotovoltaică este dependența randamentului de temperatura de la suprafața celulei  $\eta = f(t^0)$ [4].

În practică, celulele fotovoltaice funcționează cea mai mare parte a timpului în domeniul mult mai restrâns, iar o analiză detaliată a dependenței randamentului de temperatură pe domeniile uzuale de exploatare arată o reprezentare mai apropiată de o curbă de gradul doi, decât de aceea de gradul întâi.

Se observă că modelarea constă din identificarea unor corelații analitice între parametrii funcționali care descriu caracteristicile celulelor analizate.

Concluziile obținute pentru un tip de celule fotovoltaice se pot extrapola pentru orice alt tip de celule având construcții similare.

## 2.2. Parametrii care caracterizează celulelor fotovoltaice

Fiecare tip de celulă fotovoltaică este descrisă de caracteristici funcționale și constructive specifice, care o individualizează de alte tipuri de celule. Ca urmare, deși procedeul de modelare este același, corelațiile stabilite sunt specifice tipurilor constructive analizate. O parte dintre caracteristici sunt furnizate de fiecare producător, iar altele sunt determinate experimental în cadrul lucrării.

### *A. Parametrii constructivi*

Scopul realizării celulelor fotovoltaice este transformarea directă a energiei radiante în energie electrică, fără a trece prin alte forme intermediare de energie.

Ca urmare, parametrii funcționali caracteristici celulelor fotovoltaice sunt, după cum urmează:

$P_r$  - puterea consumată, reprezentată de puterea radiantă disponibilă la locul de amplasare a celulei;

It is noted that modeling consists of identifying analytical correlations between parameters describing the functional characteristics of the cells analyzed.

Conclusions obtained for a type of solar cells can be extrapolated to any other cell type with similar construction.

## *2.2. Parameters characterizing photovoltaic cells*

Each type of photovoltaic cell is described by the functional and constructive characteristics that distinguish it from other types of cells. Therefore, although the modeling process is the same, the correlations established specific structural types analyzed. Some manufacturers are supplied by each distinct family, others are determined experimentally in this paper.

### *A. Constructive parameters*

Order to achieve photovoltaic cells transform radiant energy directly into electricity without going through other intermediate forms of energy.

As a result, operating parameters features photovoltaic cells are as follows:

$P_r$  - power consumption, represented by the radiant power available at the location of the cell;

$P_{el}$  - heat output, represented by the electrical power produced by the cell in specific functional requirements;

$\eta$  - return cell, represented by direct transformation of radiant energy efficiency in

electricity  $\eta = \frac{P_{el}}{P_r}$ .

### *B. Environmental parameters outside*

May be taken into account several parameters that characterize the external environment, depending on the purpose of studying cells. From the point of view of modeling operations, taking account of experiments conducted and the results known

from the literature, one important parameter identifies the external environment:

$t^0$  - operating temperature, treated with the temperature measured at the cell surface.

$P_{el}$  - puterea utilă, reprezentată de puterea electrică produsă de celulă în condițiile funcționale specifice;

$\eta$  - randamentul celulei, reprezentat de randamentul transformării directe a energiei radiante în energie electrică  $\eta = \frac{P_{el}}{P_r}$ .

#### B. Parametrii de mediu exterior

Pot fi luați în considerație mai mulți parametri care să caracterizeze mediul exterior, în funcție de scopurile studierii celulelor. Din punctul de vedere al modelării exploatarei, ținând seama de experimentele efectuate și de rezultatele cunoscute din literatura de specialitate, se identifică un singur parametru important de mediu exterior:

$t^0$  - temperatura de exploatare, asimilată cu temperatura măsurată la suprafața celulei.

Se observă, în urma măsurătorilor efectuate că eficiența celulelor fotovoltaice este semnificativ influențată de temperatura la suprafața acestora.

#### 2.3. Ecuațiile care modelează dependența randamentului celulelor fotovoltaice de temperatura de la suprafața celulei analizate

Pentru că celulele funcționează de regulă în număr foarte mare, legate în diferite moduri, principalul parametru funcțional este randamentul celulei care este același cu randamentul ansamblului, după cum s-a arătat anterior.

Se știe că temperatura de lucru este dependentă de temperatura mediului ambiant în locul în care este exploatată celula, dar aceasta poate fi diferită de temperatura reală la suprafața celulei din diferite cauze, care nu sunt luate în considerație în cadrul cercetărilor prezentate în lucrare [6].

Se concluzionează că funcția cea mai importantă modelează funcționarea unui anumit tip de celulă fotovoltaică este dependența

randamentului de temperatura de la suprafața celulei

$$\eta = f(t^0). \quad (1)$$

Se propune aproximarea caracteristicii de randament pe baza măsurătorilor efectuate asupra

It is observed from the measurements that the efficiency of photovoltaic cells is significantly influenced by their surface temperature.

#### 2.3. Equations that model the temperature dependence efficiency photovoltaic cells analyzed cell surface

Because cells normally work in large numbers, linked in various ways, the main functional parameter is the efficiency of the cell that yield assembly is the same as mentioned above.

It is known that temperature is dependent on the ambient temperature where the cell is operated, but it may differ from the actual temperature at the cell surface of various causes, which are not considered in the research presented in this paper [6].

It is concluded that the important function models the operation of a particular type of photovoltaic cell is temperature dependent efficiency of cell surface

$$\eta = f(t^0). \quad (1)$$

It is proposed to approximate feature-based performance measurements on a known cell. The method has the advantage of using a single function approximation, applicable calculations to estimate the needs of cells in a given location.

#### 2.4. DETERMINATION OF PRACTICAL MODEL

##### 2.4.1. Processing shape measurements leading to photovoltaic cell function

Measurements made in the laboratory are described in Table 2.1 for variable radiation  $P_r = 175mW$ . The measurements devices respect the international recommendations [2].

##### 2.4.2. Equations that model the functioning of photovoltaic cells [7]

Based on measurements and calculations are obtained sets of parameters are plotted coordinates and approximate parameters considered by polynomial equations of different degrees of shape

$f : [a, b] \rightarrow R$ , using the method of small squares.

unei celule cunoscute. Metoda prezintă avantajul utilizării unei singure funcții de aproximare, aplicabilă în calculele de estimare a necesarului de celule într-o locație dată.

#### 2.4. DETERMINAREA PRACTICĂ A MODELULUI

##### 2.4.1. Prelucrarea măsurătorilor care conduc la modelează funcționarea celulelor fotovoltaice

Măsurătorile realizate în laborator sunt descrise în tabelul 2.1 pentru o radiație variabilă de  $P_r = 175mW$ . Măsurătorile și aparatele cu care au fost efectuate corespund recomandărilor din reglementările internaționale [2].

Tabelul 2.1

Măsurători pentru  $P_r = 175mW$

Nr.crt.	$P_{el}$ (mW)	$t$ (°C)	$\eta$	$\Delta t$ (°C)
1	24,00	20,00	0,122	12,01
2	23,48	20,40	0,12	11,95
3	22,00	21,30	0,116	10,65
4	20,80	22,20	0,114	9,85
5	19,40	24,60	0,102	8,43
6	13,80	26,70	0,080	5,66
7	7,60	29,40	0,060	3,11
8	4,28	30,20	0,050	1,05
9	1,38	31,35	0,040	0,00

##### 2.4.2. Ecuațiile care modelează funcționarea celulelor fotovoltaice

Pe baza măsurătorilor și a calculelor efectuate, se obțin seturi de valori ale parametrilor care se reprezintă grafic în coordonate parametrii considerați și se aproximează prin ecuații polinomiale de diferite grade de forma  $f : [a, b] \rightarrow R$ , folosind metoda celor mai mici pătrate.

Se propune aproximarea ecuației prin metoda celor mai mici pătrate. De regulă, aplicarea metodei de aproximare a celor mai mici pătrate este precedată de reprezentarea grafică a măsurătorilor experimentale, grafic ce sugerează gradul polinomului de aproximare.

Polinoamele cu grad mare au două inconveniente majore:

Table 2.1. Measurements for

$P_r = 175mW$

Nr.crt.	$P_{el}$ (mW)	$t$ (°C)	$\eta$	$\Delta t$ (°C)
1	24,00	20,00	0,122	12,01
2	23,48	20,40	0,12	11,95
3	22,00	21,30	0,116	10,65
4	20,80	22,20	0,114	9,85
5	19,40	24,60	0,102	8,43
6	13,80	26,70	0,080	5,66
7	7,60	29,40	0,060	3,11
8	4,28	30,20	0,050	1,05
9	1,38	31,35	0,040	0,00

It is proposed to approximate the equation by the method of least squares. Highly polynomials have two major drawbacks:

- although the approximation is good, the accuracy require processing a large number of measurements which, in turn, may introduce additional error;

- outside the range for which measurements even near the edges of the field, deviations can become very large and approximation accuracy is compromised, the approximation criterion is to minimize the sum of:

$$[y_i f(x_i)]^2 = \min \quad (2)$$

$x_i$  and  $y_i$  are data values.

Function that approximates the measured values  $y_i$ , denoted  $g(x)$  is written as:

$$g(x) = \sum a_k \cdot g_k(x), \text{ pentru } k = 1, n \quad (3)$$

where  $g_k(x)$  are known functions, linearly independent and  $a_k$  are undetermined parameters.

To use the method of least squares approximation by polynomials of degree  $n$ , to the extent not

represented spreadsheet functions resulting from experimental measurements, place known condition number of measurements available,  $m$ , be at least one unit higher degree polynomial considered. Form a system of  $n$  equations with  $n$  unknowns leading to the determination of the weighting coefficients allowing

$a_1, a_2, \dots, a_k, \dots, a_n$ .

- deși aproximarea este bună, precizia calculului solicită prelucrarea unui număr mare de măsurători care, la rândul lor, pot introduce erori suplimentare;
- în afara domeniului pentru care există măsurători și chiar în vecinătatea marginilor domeniului, abaterile pot deveni deosebit de mari, iar precizia aproximării este compromisă.

Pentru un polinom de grad  $n$ , coeficienții sunt  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$

Aproximarea funcțiilor prin metoda celor mai mici pătrate conduce la determinarea unei relații funcționale care elimină într-o oarecare măsură erorile. Criteriul de aproximare îl reprezintă minimizarea sumei:

$$[y_i - f(x_i)]^2 = \min \quad (2)$$

valorile  $x_i$  și  $y_i$  fiind date.

Funcția care aproximează valorile măsurate  $y_i$ , notată  $g(x)$ , se scrie sub forma:

$$g(x) = \sum a_k \cdot g_k(x), \text{ pentru } k = 1, n \quad (3)$$

unde  $g_k(x)$  sunt funcții cunoscute, liniar independente, iar  $a_k$  sunt parametri nedeterminați. Pentru utilizarea metodei celor mai mici pătrate în vederea aproximării prin polinoame de gradul  $n$  a funcțiilor reprezentate tabelar, rezultate în urma măsurătorilor experimentale, se pune condiția cunoscută ca numărul măsurătorilor disponibile,  $m$ , să fie superior cu cel puțin o unitate gradului polinomului considerat care conduce la stabilirea coeficienților permitându-se determinarea coeficienților  $a_1, a_2, \dots, a_k, \dots, a_n$ .

2.4.3. Aplicarea metodei celor mai mici pătrate pentru aproximarea caracteristicii de

randament în funcție de temperatură prin funcții polinomiale model pentru o celulă fotovoltaică

Această metodă este adoptată în lucrarea de față. Se iau în considerație datele măsurate și prezentate în tabelul nr. 2.1. și se aplică metoda celor mai mici pătrate pentru aproximarea datelor măsurate printr-un polinom de grad 1 de forma

2.4.3. The method of least squares to approximate the characteristic function of temperature yield the polynomial function model for a photovoltaic cell

This method is adopted in this paper. Taking into account the measured data and shown in Table nr. 2.1. and apply the least squares method to approximate the measured data by a polynomial of degree 1 as

$$\eta_{calc} = a_1 \cdot t + a_0 \quad (4)$$

$$\eta_{calc1} = -0,0045 \cdot t + 0,2563$$

### 3. CONCLUSIONS ON THE ANALYTICAL MODEL OPERATION

It confirms that the operating efficiency of photovoltaic cells is significantly influenced by the temperature at the surface, meaning that a decrease in temperature leads to an increase in the electrical power supplied to the same radiant power, which corresponds to an increase operational efficiency.

Polynomial approximation by the least squares method is considered the most appropriate to estimate a correlation between the expression of functional parameters of photovoltaic cells and external environmental parameters.

### 4. References

1. H. Andrei, V. Dogaru, G. Chicco, C. Cepisca, F. Spertino - *Photovoltaic Applications, Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, volume 181, Issue 1-3, 1 January 2007, pag. 267-273.

2. ASTME 941 - *Standard Test Methods for Calibration of Reference Pyranometers With Axis Tilted by Shading Methode.*

3. V. Burchiu, N. Burchiu, V. Dragan - “*Clean renewable energies and their applications*”, Editura Bren, București, 2004.

4. M. Cincă – Solar energy installations. Rev. Instalatorul 16(216), nr. 4/2003.

$$\eta_{calc} = a_1 \cdot t + a_0 \quad (5)$$

Se obține polinomul:

$$\eta_{calc} = a_1 \cdot t + a_0 \quad (4)$$

$$\eta_{calc1} = -0,0045 \cdot t + 0,2563$$

### 3.CONCLUZII ASUPRA MODELULUI ANALITIC AL FUNȚIONĂRII UNEI CELULE FOTOVOLTAICE

Se confirmă faptul că randamentul de funcționare a celulelor fotovoltaice este semnificativ influențat de temperatura la suprafața acestora, în sensul că o scădere a temperaturii conduce la o creștere a valorii puterii electrice furnizată la aceeași putere radiantă, ceea ce corespunde unei creșteri a randamentului de funcționare.

Aproximarea polinomială prin metoda celor mai mici pătrate este considerată cea mai potrivită pentru estimarea unei expresii a corelației dintre parametrii funcționali ai celulelor fotovoltaice și parametrii de mediu exterior.

### 4.Bibliografie

1. H. Andrei, V. Dogaru, G. Chicco, C. Cepisca, F. Spertino - *Photovoltaic Applications, Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, volume 181, Issue 1-3, 1 January 2007, pag. 267-273.

2. ASTME 941 - *Standard Test Methods for Calibration of Reference Pyranometers With Axis Tilted by Shading Methode.*

3. V. Burchiu, N. Burchiu, V. Dragan - “*Energii neconvenționale curate și utilizarea acestora*”, Editura Bren, București, 2004.

4. M. Cincă – *Instalații pentru utilizarea energiei solare.* Rev. Instalatorul 16(216), nr. 4/2003.

5. European Photovoltaic Industry Association - *Photovoltaics in 2010. Photovoltaics: Current Status and a Strategy for European Industrial and Market Development to the year 2010.*

6. T. Markvart, L. Castafier – *Practical handbook of photovoltaic: fundamentals and applications*, Elsevier 2003, ISBN-10: 1-85617-390-9.

7. [http://www.eng.fsu.edu/~cockburn/matlab/matlab\\_help.html](http://www.eng.fsu.edu/~cockburn/matlab/matlab_help.html) MATLAB/SIMULINK Internet Resources

5. European Photovoltaic Industry Association - *Photovoltaics in 2010. Photovoltaics: Current Status and a Strategy for European Industrial and Market Development to the year 2010.*

6. T. Markvart, L. Castafier – *Practical handbook of photovoltaic: fundamentals and applications*, Elsevier 2003, ISBN-10: 1-85617-390-9.

7. [http://www.eng.fsu.edu/~cockburn/matlab/matlab\\_help.html](http://www.eng.fsu.edu/~cockburn/matlab/matlab_help.html) MATLAB/SIMULINK Internet Resources