



Universitatea Politehnică București
Școala Doctorală de Inginerie Electrică



*Relații și metode noi de determinare cu precizie ridicată
a coordonatelor punctului de putere maximă al unei celule fotovoltaice
(Rezumat)*

Autor:
Ing. Mircea TACIUC

Conducător doctorat:
Prof.dr.ing. Aurelian CRĂCIUNESCU

București
2020

PREFAȚĂ

Această teză a fost realizată pe parcursul derulării studiilor universitare de doctorat în cadrul Școlii Doctorale de Inginerie Electrică, sub coordonarea științifică a domnului prof. univ. dr. ing. Aurelian Crăciunescu.

Pe această cale, doresc să îi mulțumesc conducătorului de doctorat, domnului prof. univ. dr. ing. Aurelian Crăciunescu, pentru sprijinul acordat pe tot parcursul perioadei de desfășurare a studiilor universitare de doctorat dar și pentru suportul acordat în elaborarea prezentei lucrări.

Vreau să mulțumesc membrilor familiei mele, care au înțeles și m-au susținut în eforturile mele de a finaliza această lucrare, important prag în parcursul carierei mele profesionale.

În cele din urmă doresc să mulțumesc tuturor profesorilor care au contribuit de a lungul timpului la formarea mea educațională și profesională.

Mircea Taciuc

CUPRINS (TEZA ORIGINALĂ)

Notății și abrevieri	pag. v
Lista figurilor	pag. vii
Lista tabelelor	pag. X
Introducere	pag. xi
Scopul și obiectivele lucrării	pag. xii
Structura tezei de doctorat	pag. Xiii
Capitolul 1. Modele fizice ale celulei fotovoltaice ca modele de referință pentru calculul caracteristicilor tehnice ale celulelor fotovoltaice	pag. 1
1.1. Modelul cu trei parametri (3P)	pag. 2
1.1.1. Caracteristicile tensiune-curent. Descrierea parametrilor și a principalelor puncte ale caracteristicilor tensiune-curent	pag. 3
Factorul de idealitate (m)	
Curentul fotovoltaic (I_L)	
Curentul de saturație (I_0)	
Curentul de scurt-circuit (I_{sc})	
Tensiunea de funcționare în gol (V_{oc})	
1.1.2. Caracteristicile de putere	pag. 7
Punctul de putere maximă (P_{max})	
Factorul de umplere (FF)	
1.2. Modelul cu rezistențe „parazite”	pag. 9
1.2.1. Modelul cu cinci parametri (5P)	pag. 10
Rezistențele parazite și efectul acestora asupra caracteristicii I-V	
1.2.2. Modelul cu patru parametri (4P)	pag. 13
1.3. Modelarea sistemelor fotovoltaice cu celule multiple	pag. 14
Capitolul 2. Formele normalizate ale ecuațiilor caracteristice	pag. 16
2.1. Conversia parametrilor I_L și I_0	pag. 19
2.1.1. Conversia parametrilor pentru modelul 3P	pag. 20
2.1.2. Conversia parametrilor pentru modelul 4P	pag. 21
2.1.3. Conversia parametrilor pentru modelul 5P	pag. 22
2.2. Formele normalizate ale ecuațiilor caracteristice	pag. 23
2.2.1. Formele normalizate - Modelul 3P	pag. 24
2.2.2. Formele normalizate - Modelul 4P	pag. 25
2.2.3. Formele normalizate - Modelul 5P	pag. 25
2.3. Concluzii.....	pag. 26
Capitolul 3. Formele explicite ale ecuațiilor caracteristice	pag. 27
Rezolvare folosind funcția W a lui Lambert.	
3.1. Funcția W a lui Lambert	pag. 29
3.2. Determinarea formelor explicite ale ecuațiilor caracteristice	pag. 30

3.3. Formele simplificate ale caracteristicilor explicate	pag. 35
3.3.1. Forma simplificată 1 (SF1)	pag. 37
3.3.2. Forma simplificată 2 (SF2)	pag. 37
3.3.3. Forma simplificată 3 (SF3)	pag. 38
3.4. Efectul simplificărilor asupra caracteristicii I-V	pag. 39
3.5. Concluzii.....	pag. 44
Capitolul 4. Metode numerice de calcul al valorilor funcției W a lui Lambert	pag. 45
4.1. Metoda iterativă Newton-Raphson	pag. 46
4.2. Metoda iterativă Halley	pag. 49
4.3. Subrutină proprie de calcul a valorilor funcției W (<i>funcția Q_lambertw</i>)	pag. 50
4.4. Evaluarea vitezei de procesare și a preciziei funcției propuse pentru calculul valorilor funcției W (<i>funcția Q_lambertw</i>)	pag. 52
4.5. Concluzii.....	pag. 56
Capitolul 5. Relații pentru determinarea coordonatelor punctului de putere maximă. Modelul cu trei parametri (3P)	pag. 58
5.1. Modelul cu trei parametri (3P)	pag. 60
5.1.1. Metode de rezolvare ale ecuațiilor propuse	pag. 61
A. Rezolvare prin metoda grafo-analitică	pag. 61
1) Aproximarea liniară	
2) Aproximarea quadratică	
B. Rezolvare pe baza funcției W a lui Lambert	pag. 64
Aproximarea termenului W_0	
5.1.2. Evaluarea preciziei relațiilor propuse	pag. 68
5.2. Concluzii.....	pag. 72
Capitolul 6. Relații pentru determinarea coordonatelor punctului de putere maximă. Modelul cu patru parametri (4P)	pag. 73
6.1. Modelul cu patru parametri - 4P	pag. 74
6.1.1. Metode de rezolvare ale ecuației propuse	pag. 75
A. Rezolvare pe baza funcției W a lui Lambert	
B. Rezolvare prin aproximarea quadratică a curbei	
C. Metodă de rezolvare prin aproximarea suprafeței soluțiilor	
D. Rezolvare bazată pe metoda iterativă Newton-Raphson (o singură iterație)	
6.1.2. Evaluarea preciziei relațiilor propuse	pag. 84
6.2. Concluzii.....	pag. 87
Capitolul 7. O nouă metodă de estimare a coordonatelor punctului de putere maximă pentru cazul modelului 5P. Metoda intersecției	pag. 88
7.1. Considerente generale privind precizia de determinare a punctului de putere maximă	pag. 89
7.2. Estimarea punctului de putere maximă prin metoda intersecției	pag. 92
7.2.1. Expresia tangentei în punctul Isc	pag. 92
7.2.2. Expresia tangentei în punctul Voc	pag. 92
7.2.3. Determinarea punctului de intersecție al tangentelor	pag. 94
7.2.4. Ecuația dreptei (d)	pag. 94
7.2.5. Estimarea coordonatelor punctului $X(V_X, I_X)$	pag. 95
7.2.6. Aproximarea valorilor funcției W a lui Lambert	pag. 98
7.3. Evaluarea preciziei relațiilor propuse	pag. 98

7.4. Concluzii	pag. 105
Capitolul 8. Sistem experimental pentru ridicarea caracteristicii panourilor fotovoltaice	pag. 106
8.1. Principiul de măsurare a caracteristicii I-V pentru panourile fotovoltaice	pag. 107
8.2. Principalele metode de variație a rezistenței de sarcină	pag. 108
a. Variația rezistenței de sarcină cu reostate	
b. Variația rezistenței de sarcină având la bază condensatoare	
c. Sistem electronic de variație a rezistenței de sarcină bazat pe tranzistoare de putere	
8.3. Concepția și realizarea sistemului electronic de variație	
a rezistenței de sarcină	pag. 111
8.3.1. Definiții și analiză teoretică	pag. 112
8.3.2. Dimensionarea și alegerea tranzistoarelor	pag. 113
8.3.3. Circuitul electronic de comandă a tranzistoarelor	pag. 117
8.4. Descrierea sistemului experimental	pag. 118
7.4.1. Descrierea principalelor componente ale sistemului experimental	pag. 120
8.5. Concluzii	pag. 124
Capitolul 9. Analiza datelor experimentale	pag. 126
9.1. Exemple de date experimentale obținute	pag. 127
9.2. Analiza și procesarea datelor experimentale obținute	pag. 130
9.2.1. Validarea și rafinarea datelor experimentale.....	pag. 130
Stabilirea criteriilor de eliminare a datelor eronate	
9.3. Concluzii	pag. 133
Capitolul 10. Validarea ecuațiilor explicite pe baza datelor experimentale	pag. 134
10.1. Etapa 1. Determinarea parametrilor (m , R_s și R_p)	pag. 135
10.2. Etapa 2. Aproximarea prin regresie polinomială	pag. 138
10.3. Etapa 3. Compararea gradului de aproximare dintre aproximarea pe baza relației explicite și aproximarea prin regresie polinomială	pag. 139
10.4. Concluzii	pag. 140
Capitolul 11. Contribuții originale.....	pag. 141
Articole publicate de autor în domeniul tezei de doctorat	pag. 145
Bibliografie	pag. 146
ANEXE	
ANEXA I. Coduri funcții MatLab	pag. 149
ANEXA II. Date simulări „metoda intersecției”	pag. 155
ANEXA III. Date tehnice Tranzistor MOSFET IRFP-2907	pag. 161
ANEXA IV. Sistemul experimental amplasat pe acoperișul Facultății de Inginerie Electrică	pag. 165
ANEXA V. Exemple de date experimentale	pag. 167
ANEXA VI. Exemplul 2. Aproximare polinomială vs. aproximare Lambert explicit	pag. 172

Nota: În conținutul acestui rezumat sunt utilizate numerotările referințelor și ale relațiilor din teza originală.

Cuvinte cheie: *coordonatele punctului de putere maximă, metoda de intersecție, modelul cu o singură diodă, aplicații ale funcției W Lambert, forme explicite ale caracteristicii celulelor fotovoltaice, sarcina electronică variabilă*

INTRODUCERE

Punctul de putere maximă reprezintă cel mai important punct de pe caracteristica de funcționare a unei celule fotovoltaice. Dinamicitatea condițiilor reale de operare, ale unei celule fotovoltaice, se reflectă integral asupra poziției acestui punct, fiind amplificată de o corelare de tip neliniar. Datorită acestei corelații neliniare dar și a dinamicității condițiilor de operare identificarea precisă a coordonatelor punctului de putere maximă se transformă într-o sarcină dificilă.

Stabilirea poziției punctului de putere maximă pentru celulele fotovoltaice este un subiect pentru multe lucrări din literatura de specialitate. Majoritatea lucrărilor tratează subiectul pe baza implementării unor algoritmi și doar o mică parte a lucrărilor tratează subiectul în mod analitic, pornind de la modele teoretice ale celulei fotovoltaice.

Abordări ce au la bază algoritmi

Algoritmii “clasici” cei mai studiați sunt cei de tip Perturb and Observe (PO) sau de tip Incremental Conductance (IC) iar algoritmii moderni sunt implementări derivate din algoritmi de tip calcul evoluționar (EC-Evolutionary Computation) cum ar fi Differential Evolution (DE), Genetic Algorithm (GA), Particle Swarms Optimization (PSO).

Abordări de tip analitic

Din punct de vedere al analizei teoretice, dificultatea identificării poziției punctului de putere maximă se datorează prezenței ecuațiilor de tip implicit-transcendent în modelele matematice ce descriu fenomenul fotoelectric ce are loc la nivelul celulelor fotovoltaice.

Un set de relații pentru calculul coordonatelor punctului de putere maximă vor defini foarte clar poziția acestui punct pe caracteristica celulei fotovoltaice. Identificarea unor stfel de relații pot simplifica semnificativ și problematica inversă: determinarea parametrilor principali ai modelului matematic utilizat în descrierea celulelor fotovoltaice.

Majoritatea lucrărilor din literatura de specialitate tratează identificarea unor relații matematice pentru estimarea puterii maxime prin prisma factorului de umplere (FF). Dezavantajul acestui tip de abordare îl reprezintă faptul că valoarea factorului de umplere oferă indicii doar asupra valorii puterii maxime și a eficienței celulei fotovoltaice dar nu oferă indicii clare privind poziția/coordonatele punctului de putere maximă pe caracteristica tensiune-curent a celulei fotovoltaice. În literatura de specialitate se regăsesc relații relativ precise pentru estimarea factorului de umplere dintre care cea mai utilizată, pentru modelul cu trei parametri, este “relația Green” (5.1.37).

SCOPUL ȘI OBIECTIVELE LUCRĂRII

Scopul principal al acestei lucrări este de a identifica relații explicite pentru calculul direct (non-iterativ) al coordonatelor punctului de putere maximă pentru celulele fotovoltaice unijonțiune pe bază de siliciu.

În această lucrare sunt propuse mai multe seturi de relații matematice pentru calculul cu precizie ridicată al coordonatelor punctului de putere maximă. Sunt prezentate relații atât pentru modelul cu trei parametri (3P-“modelul ideal”), pentru modelul cu patru parametri (4P) cât și pentru modelul cu cinci parametri (5P).

Metodele de rezolvare a problematicii se bazează pe două tipuri de abordări, una ce are la bază o serie de proprietăți analitico-geometrice ale caracteristicii tensiune-curent a celulelor foto-voltaice iar cealaltă are la bază proprietăți ale funcției W a lui Lambert utile în rezolvarea ecuațiilor de tip transcendent.

Pentru modelul cu cinci parametri este identificată și propusă o relație de calcul al coordonatelor punctului de putere maximă ce se bazează pe o metodă originală (“metoda intersecției”) de identificare a acestuia. Metoda se bazează pe observarea unei proprietăți legate de punctul de intersecție al dreptelor tangente la curba caracteristică tensiune-curent a celulelor foto-voltaice.

Ca scop secundar, dar nu mai puțin important, lucrarea de față își propune să prezinte modul de proiectare, execuție și utilizare a unui sistem experimental destinat “ridicării” caracteristicii tensiune-curent pentru panourile foto-voltaice în condiții reale de funcționare.

Sistemul experimental a fost instalat pe acoperișul Facultății de Inginerie Electrică București și în urma operării acestuia au fost „colectate” un număr mare de caracteristici tensiune-curent pentru o variată plajă a condițiilor de funcționare (intensitatea radiației solare și temperatură de operare) a panourilor testate.

STRUCTURA TEZEI DE DOCTORAT

Prezenta lucrare este structurată în zece capitole. Lucrarea este divizată în două părți generale: o parte de studiu teoretic și o parte practică.

Partea de studiu teoretic este dedicată analizei punctului de putere maximă a celulelor fotovoltaice. Această parte este orientată cu predilecție spre identificarea unor relații matematice care să asigure calculul direct al coordonatelor celui mai important punct de pe caracteristicile de operare ale unei celule fotovoltaice: punctul de putere maximă. Studiul pornește de la cele trei modele descrise în partea introductivă. Studiul teoretic se definitivează cu identificarea a mai multor relații de calcul pentru coordonatele punctului de putere maximă pentru fiecare din cele trei modelele studiate.

Partea practică este dedicată descrierii modului de proiectare, execuție și operare a unui sistem experimental, complet automatizat, ce este utilizat pentru “colectarea” caracteristicilor tensiune-curent pentru celule/panouri fotovoltaice. Realizarea unui astfel de sistem experimental a rezultat din necesitatea firească de a crea o bază de date alcătuită din caracteristici tensiune-curent obținute pentru o gamă cât mai variată de condiții reale de operare a celulelor/panourilor fotovoltaice. Datele experimentale astfel obținute pot fi foarte utile în înțelegerea funcționării celulelor fotovoltaice în condiții reale dar și în verificarea/validarea diferitelor relații matematice destinate modelării celulelor fotovoltaice.

Capitolul 1

Modele fizice al celulei fotovoltaice ca modele de referință pentru calculul caracteristicilor tehnice ale celulelor fotovoltaice

În acest capitol se face o prezentare generală a ecuațiilor caracteristice, ale celulelor fotovoltaice și ale parametrilor acestora, ce sunt derivate din binecunoscutul model cu o singură diodă. Ecuațiile prezentate în acest capitol reprezintă baza studiului teoretic dezvoltat în cadrul prezentei lucrări.

Capitolul 2

Formele normalizate ale ecuațiilor caracteristice

În acest capitol este propusă și prezentată o abordare originală (nouă în literatura de specialitate) privind rescrierea ecuațiilor caracteristice ale celulelor fotovoltaice într-o formă normalizată.

Rescrierea în formă normalizată a ecuațiilor caracteristice are la bază observația că valorile maxime ale tensiunii (V_{oc}) respectiv ale curentului (I_{sc}) de pe caracteristica de funcționare a unei celule fotovoltaice sunt bine definite pentru fiecare set de valori ai parametrilor externi de funcționare (intensitatea radiației solare și temperatura de operare). Pornind de la această observație sunt propuse forme normalizate pentru toate cele trei modele abordate în cadrul lucrării de față.

Utilizarea formelor normalizate beneficiază de câteva avantaje importante, dintre care unele se vor evidenția în capitolele următoare ale prezentei lucrări.

Ecuațiile caracteristice normalizate au o formă mai simplă cu un număr redus de termeni, ceea ce le face mai ușor de utilizat pentru operațiuni matematice, cum ar fi derivarea și/sau integrarea, aplicate ecuațiilor caracteristice.

Formele normalizate prezintă avantaje și în ceea ce privește reprezentările în formă grafică a curbilor caracteristice. Reprezentările grafice ale acestor curbe sunt reduse la primul cadran unitar ceea ce ajută la interpretarea mai ușoară a acestora. De asemenea, reprezentarea în primul cadran unitar ar putea ajuta la dezvoltarea facilă a rescrierii ecuațiilor caracteristice într-o formă de tip polar (subiect neabordat încă în literatura de specialitate).

Un alt avantaj al formelor normalizate este dat de faptul că au la bază doi parametri ce pot fi obținuți cu ușurință experimental prin măsurări directe (I_{sc} și V_{oc}), ceea ce le face utile pentru procesarea datelor experimentale.

În continuarea acestei lucrări referirile la aceste forme ale ecuațiilor celulelor fotovoltaice se va face sub denumirea generică de “forme normalizate”.

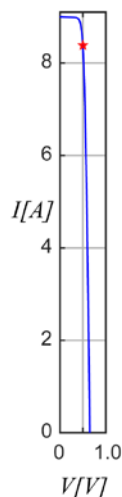
Pentru rescrierea în formă normalizată a ecuațiilor celulelor fotovoltaice se propun următoarele schimbări de variabile:

$$\begin{cases} \bar{V} = \frac{V}{V_{oc}} \\ \bar{I} = \frac{I}{I_{sc}} \end{cases}$$

Se folosesc și parametrii ecuațiilor exprimați în forme normalizate [3]:

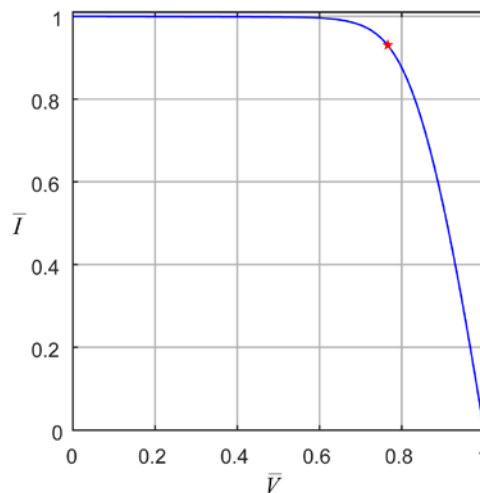
Tensiunea de funcționare fără sarcină în formă normalizată (v_{oc})	$v_{oc} = \frac{V_{oc}}{m \cdot V_T}$
Rezistența serie normalizată (r_s)	$r_s = \frac{R_s}{R_{ch}} = \frac{R_s}{\left(\frac{V_{oc}}{I_{sc}}\right)}$
Rezistența paralelă normalizată (r_p)	$r_p = \frac{R_p}{R_{ch}} = \frac{R_p}{\left(\frac{V_{oc}}{I_{sc}}\right)}$
Rezistența caracteristică a celulei fotovoltaice	$R_{ch} = \frac{V_{oc}}{I_{sc}}$

$I_{sc}=9A$; $V_{oc}=0.65V$; $I_{max}=8.375A$; $V_{max}=0.4975V$
 $P_{max}=4.1666W$; $FF=0.7122$



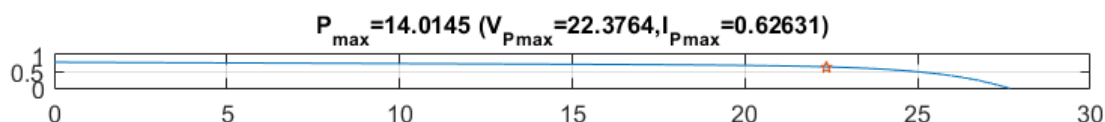
a) reprezentare în formă ne-normalizată

$\bar{P}_{max}=FF=0.7122$; $\bar{V}_{max}=0.7654$; $\bar{I}_{max}=0.9305$

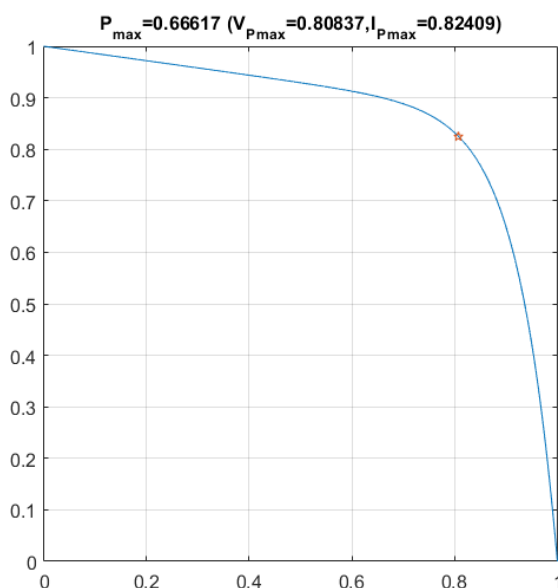


b) reprezentare în formă normalizată

Fig. 2.1. Reprezentarea grafică a caracteristicii $I-V$ pentru o celulă fotovoltaică
Cazul: o singură celulă expusă la intensități mari ale radiației solare
(Reprezentare cu aceeași scară pe ambele axe)



a) reprezentare în formă ne-normalizată



b) reprezentare în formă normalizată

Fig. 2.2. Reprezentarea grafică a caracteristicii $I-V$ pentru o celulă fotovoltaică
Cazul: celule inseriate (panou fotovoltaic) expuse la intensități mici ale radiației solare
(Reprezentare cu aceeași scară pe ambele axe)

Capitolul 3

Formele explicite ale ecuațiilor caracteristice

Rezolvare folosind funcția W a lui Lambert

Cu excepția modelului cu trei parametri (3P), utilizarea ecuațiilor caracteristice în forma generală (1.2.1), (1.2.3) este greoaie datorită formei implicit-transcendente ale acestora. Analiza caracteristicilor pe baza acestor ecuații presupune utilizarea de procese iterative cu o scheme logice relativ complexe și care necesită un timp mare de procesare. Problema inversă, de determinare a parametrilor, în condițiile în care se dispune de date experimentale, este și mai laborioasă necesitând un timp de procesare foarte mare mai ales în cazul în care sunt analizate mai multe seturi de date experimentale.

În prima parte a acestui capitol, pornind de la ecuațiile (1.2.1) (1.2.3), se determină o formă explicită a caracteristicilor I - V respectiv V - I . Demonstrația matematică, prezentată în continuare, în urma căreia sunt identificate formele explicite ale ecuațiilor celulelor fotovoltaice are la bază utilizarea funcției W a lui Lambert în rezolvarea ecuațiilor implicite de tip exponențial sau logaritmice. Demonstrația pornește de la forma normalizată, propusă în această lucrare, a ecuației caracteristice a modelului cu cinci parametri (2.2.22) și pune în evidență „procesarea” matematică facilă a formelor normalizate.

În partea a doua, a acestui capitol, sunt propuse o serie de aproximări ce pot fi aplicate ecuațiilor explicite obținute fără a le afecta în mod semnificativ precizia de estimare a curbelor caracteristice. Scopul aplicării acestor simplificări este de a reduce numărul de termeni ai ecuațiilor caracteristice și de a face mult mai ușoară utilizarea acestora. În urma aplicării aproximărilor propuse sunt obținute trei forme simplificate ale ecuației explicite de bază (SF1)(SF2)(SF3).

În partea finală a capitolului este prezentată o analiză a efectului simplificărilor adoptate asupra preciziei de determinare a caracteristicii tensiune-curent. Analiza este realizată pe baza unor simulări numerice iar rezultatele sunt prezentate prin compararea acestora cu simulările numerice obținute pe baza formei inițiale nesimplificate.

În urma acestor simulări a rezultat faptul că două dintre formele simplificate propuse au abatere de determinare mai mică de 15ppm. Cea de a treia formă propusă are o abatere de determinare mai mică de 0.2% ceea ce o face suficient de precisă pentru orice tip de evaluări ale caracteristicilor celulelor fotovoltaice.

Formele explicite normalizate obținute ale ecuațiilor caracteristice ale celulei fotovoltaice, pentru modelul cu cinci parametri (5P), sunt prezentate mai jos.

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{I}(\bar{V}) = A - \frac{W\{B \cdot C \cdot e^{(A \cdot C)}\}}{C} \\ A = \frac{1}{r_s + r_p} \cdot [(r_s + r_p - 1) \cdot \bar{E}_{rs} + 1 - \bar{V}] \\ B = \frac{r_s + r_p - 1}{r_s + r_p} \cdot \bar{E}_{rs} \cdot e^{v_{oc}(\bar{V}-1)} \\ C = r_s \cdot v_{oc} \end{array} \right. \quad (3.2.15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{V}(\bar{i}) = A' - \frac{W \{B' \cdot C' \cdot e^{(A' \cdot C')}\}}{C'} \\ A' = (r_s + r_p - 1) \cdot \bar{E}_{rs} - \bar{I} \cdot (r_s + r_p) + 1 \\ B' = (r_s + r_p - 1) \cdot \bar{E}_{rs} \cdot e^{v_{oc} \cdot (r_s \cdot \bar{I} - 1)} \\ C' = v_{oc} \end{array} \right. \quad (3.2.16)$$

Unde, pentru \bar{E}_{rs} , a fost utilizată notația (2.2.18):

$$\bar{E}_{rs} = \frac{1}{1 - \frac{1}{e^{v_{oc} \cdot (1 - r_s)}}} \quad (3.2.16')$$

Capitolul 4

Metode numerice de calcul al valorilor funcției W a lui Lambert

Avantajul formelor explicite prezentate în *Capitolul 3* este diminuat de prezența funcției W a lui Lambert în cadrul acestor relații. Deoarece funcția W a lui Lambert nu este o funcție algebrică, calculul exact al valorilor acesteia nu poate fi realizat pe baza unor relații de calcul cu număr finit de operații. Pentru calculul aproximativ, dar cu precizie foarte bună, al valorilor acestei funcții sunt necesare implementări de metode numerice iterative/ recursive.

Obiectivul acestui capitol îl reprezintă identificarea unei metode numerice de tip iterativ care să permită calculul cât mai rapid și precis al valorilor funcției W a lui Lambert.

În acest capitol este propusă și prezentată o funcție de concepție proprie ($Q_lambertw$), pentru calculul rapid și precis al valorilor funcției W a lui Lambert. Subrutina propusă a fost concepută sub forma unui script Matlab și are la bază un algoritm iterativ derivat din metoda Halley adaptat pentru funcția W a lui Lambert [14].

În prima parte a acestui capitol este făcută o prezentare a doi algoritmi iterativi derivați din metoda Newton-Raphson respectiv din metoda Halley ce pot fi utilizați pentru calculul numeric al valorilor a funcției W a lui Lambert.

În acest capitol este propus și prezentat un algoritm iterativ adaptat pentru calculul valorilor funcției W a lui Lambert (pentru valorile pozitive ale ramurii W_0). De asemenea, este propus un set de valori inițiale pentru algoritmul implementat și sunt prezentate criteriile de optimizare ce au fost adoptate pentru creșterea vitezei de procesare.

Pe baza algoritmului propus a fost implementată, în MatLab, o funcție ($Q_lambertw$) ce asigură procesarea extrem de rapidă și foarte precisă a valorilor funcției W a lui Lambert.

În partea finală a capitolului sunt prezentate rezultatele evaluării funcției propuse ($Q_lambertw$) din punct de vedere al vitezei de procesare și al preciziei de calcul al valorilor funcției W a lui Lambert. Datele obținute sunt prezentate comparativ cu rezultatele obținute cu funcția “ $lambertw$ ” ce este inclusă în pachetul standard de funcții Matlab. În urma acestei comparații se arată faptul că funcția propusă este de ordinul sutelor de ori mai rapidă și cel puțin la fel de precisă cu funcția “ $lambertw$ ” ce este inclusă în pachetul standard de funcții Matlab.

Pe baza funcției propuse ($Q_lambertw$) a fost dezvoltat un set de funcții MatLab ce asigură procesarea extrem de rapidă a caracteristicilor pentru celulele fotovoltaice. Aceste funcții asigură evaluarea a 1000 de caracteristici, fiecare compusă din 500 de puncte, în mai puțin de 0.5msec. (MatLab R2016a instalat pe o platforma Intel Core-i3-Gen4).

Capitolul 5

*Relații pentru determinarea coordonatelor punctului de putere maximă.
Modelul cu trei parametri (3P)*

În acest capitol sunt determinate patru seturi de relații explicite pentru calculul direct (non-iterativ) al coordonatelor punctului de putere maximă pentru modelul cu trei parametri (3P-“modelul ideal”). Relațiile propuse, în acest capitol, sunt determinate pornind de la formele normalizate ale ecuațiilor caracteristice ale modelului analizat.

Determinarea relațiilor este realizată prin două abordări diferite: una grafo-analitică iar cealaltă pe baza proprietăților funcției W a lui Lambert. Ambele abordări sunt aplicate pentru rezolvarea a cel puțin uneia dintre ecuațiile ce rezultă din anularea derivatei funcțiilor de putere obținute din caracteristicile tensiune-curent.

Evaluarea preciziei pentru fiecare set de relații determinat este realizată prin simulări numerice folosind software-ul MatLab. Datele simulărilor sunt prezentate prin raportarea

rezultatelor obținute, pe baza relațiilor propuse, la rezultatele obținute prin rezolvarea precis-numerică a ecuațiilor de bază utilizând “solver-ul” simbolic “*vpasolve*” implementat în MatLab.

Pentru a pune în evidență precizia excepțională a relațiilor propuse în această lucrare a fost evaluată și precizia celei mai utilizate relații din literatură, pentru estimarea factorului de umplere (*FF*): “relația Green” (5.1.37).

Analiza comparativă indică faptul că toate cele patru relații identificate pentru modelul cu trei parametri sunt mai precise decât „relația Green”. Relațiile propuse au marele avantaj că identifică punctul de putere maximă prin definirea clară a celor două coordonate ale acestui important punct.

Cel puțin două dintre relațiile propuse în această lucrare (5.1.34) (5.1.35) pot fi considerate ca fiind cele mai precise din literatura de specialitate în ceea ce privește determinarea explicit-analitică a coordonatelor punctului de putere maximă pentru modelul cu trei parametri.

$$\begin{cases} \bar{I}_{\max} \cong 1 - \left(\frac{1}{v_{oc} + 1} \right)^{\left(\frac{v_{oc}}{v_{oc} + 1} \right)} \\ \bar{V}_{\max} \cong 1 - \frac{\ln(v_{oc} + 1)}{v_{oc} + 1} \end{cases} \quad (5.1.35)$$

Capitolul 6

*Relații pentru determinarea coordonatelor punctului de putere maximă.
Modelul cu patru parametri (4P)*

În această parte a lucrării sunt propuse trei seturi de relații de mare precizie pentru estimarea coordonatelor punctului de putere maximă pentru celulele solare. Relațiile propuse au formă explicită și au avantajul că permit calculul direct al coordonatelor punctului putere maximă sau a factorului de umplere.

Determinarea acestor relații este realizată prin trei metode de diferite: rezolvare pe baza proprietăților funcției *W* a lui Lambert, rezolvare prin aproximarea suprafeței parametrică definită de soluțiile ecuației studiate și rezolvare prin reducerea metodei iterative Newton-Raphson la o singură iterație.

Evaluarea preciziei pentru fiecare set de relații determinat este realizată prin simulări numerice folosind software-ul MatLab. Datele simulărilor sunt prezentate prin raportarea

rezultatelor obținute, pe baza relațiilor propuse, la rezultatele obținute prin rezolvarea precis-numerică a ecuațiilor de bază utilizând “solver-ul” simbolic “*vpasolve*” implementat în MatLab.

Dintre relațiile propuse în acest capitol se remarcă relația (6.1.44), caracterizată de o forma simplă cu o eroare relativă în derminarea coordonatei în curent a punctului de putere maximă mai bună de $2 \cdot 10^{-4}$ și relația (6.1.46) care deși are o formă relativ complexă este caracterizată de o eroare relativă în derminarea coordonatei în curent a punctului de putere maximă (pentru modelul cu patru parametri) mai mică de $2 \cdot 10^{-6}$ (2ppm).

$$\bar{I}_{\max(rs)} \cong 1.0044 - \frac{1.68 \cdot r_s^2 + 1.22}{v_{oc} \cdot (1 - 1.78 \cdot r_s) + 14.4 \cdot r_s^2 + 0.4} \quad (6.1.44)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{I}_{\max(rs)} \cong 1 - \frac{1 + (1 - X_0) \cdot [1 + 2r_s v_{oc} (1 - X_0)]}{2 + v_{oc} - 2r_s v_{oc} (2X_0 - 1) + \ln(1 - X_0)} \\ X_0 = 1.0044 - \frac{1.68 \cdot r_s^2 + 1.22}{v_{oc} \cdot (1 - 1.78 \cdot r_s) + 14.4 \cdot r_s^2 + 0.4} \end{array} \right. \quad (6.1.46)$$

$$\bar{V}_{\max(rs)} = \bar{I}_{\max(rs)} \cdot \left[r_s + \frac{1}{v_{oc} \cdot (1 - \bar{I}_{\max(rs)})} \right] \quad (6.1.14)$$

Capitolul 7

O nouă metodă de estimare a coordonatelor punctului de putere maximă pentru cazul modelului cu cinci parametri (5P). Metoda intersecției.

În acest capitol este propusă o nouă metodă, denumită generic metoda intersecției, de identificare a coordonatelor punctului de putere maximă pentru modelul cu cinci parametri (5P).

În urma studiului a multor seturi de date experimentale, obținute pentru diverse tipuri de celule/panouri fotovoltaice, a fost identificată o corelație între poziția punctului de putere maximă și punctul definit de intersecția tangențelor, la curba caracteristică, în punctele $(0, I_{sc})$ și $(V_{oc}, 0)$. Analiza a evidențiat faptul că punctul de putere maximă este foarte apropiat de un punct $X(V_x, I_x)$ definit de intersecția dintre curba $I-V$ și o dreaptă (d) ce este determinată de următoarele două puncte (Fig. 7.1.3-6.1.5):

- Punctul de origine ($I=0, V=0$);
- Punctul $M(I_M, V_M)$, punct determinat de intersecția tangențelor în I_{sc} respectiv în V_{oc} , la curba $I-V$

Observarea acestei corelații a condus la o abordare de tip grafo-analitic, în urma căreia a fost determinat un set de relații cu ajutorul cărora se pot estima coordonatele punctului de putere maximă pentru modelul cu cinci parametri.

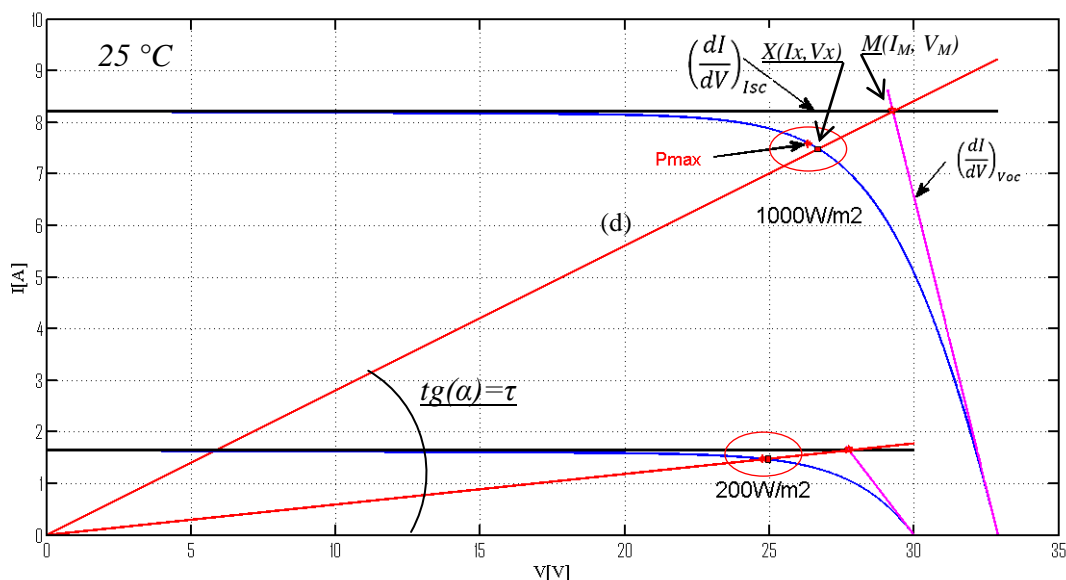


Fig. 7.1.3. Punctul de intersecție pentru 1000W/m^2 și 200W/m^2

Relațiile propuse în acest capitol (7.2.34a,b) pot fi utilizate în estimarea coordonatelor punctului de putere maximă cu o precizie mai bună de 3% pentru coordonata în tensiune (V_{max}) și cu o precizie mai bună de 4% pentru coordonata în curent (I_{max}).

Cu ajutorul acestor relații se poate realiza estimarea puterii maxime, pentru modelul cu cinci parametri (5P), cu o precizie mai bună de 1%.

$$\left\{ \bar{I}_X \cong \bar{I}_{\max} \cong \frac{v_{oc} \cdot (r_p - 1) + 1}{r_p \cdot v_{oc}} \cdot \left\{ 1 - \frac{0.577}{v_{oc} - 1} \cdot \ln \left[0.75 \cdot \left(1 - \frac{1}{r_p} \right) \cdot (v_{oc} - 1) \right] \right\} \right\} \quad (7.2.34a)$$

$$\left\{ \bar{V}_X \cong \bar{V}_{\max} \cong \frac{v_{oc} \cdot (1 - r_s) - 1}{v_{oc}} \cdot \left\{ 1 - \frac{0.577}{v_{oc} - 1} \cdot \ln \left[0.75 \cdot \left(1 - \frac{1}{r_p} \right) \cdot (v_{oc} - 1) \right] \right\} \right\} \quad (7.2.34b)$$

Capitolul 8

Sistem experimental pentru ridicarea caracteristicii panourilor fotovoltaice

În mod uzual, producătorii de celule/panouri fotovoltaice furnizează valori ale princiabilelor puncte ale caracteristicii I - V , valori obținute în condiții de laborator (condiții standard de testare – STC și/sau NOCT). Aceste date oferă indicii orientative privind caracteristica I - V și de regulă supraestimate relativ la comportamentul celulelor/modulelor fotovoltaice în condiții reale de funcționare.

În acest capitol este prezentată o descriere detaliată a unui sistem experimental, proiectat și realizat, care poate fi utilizat pentru “ridicarea” curbelor caracteristice curent-tensiune pentru panourile fotovoltaice în condiții reale de funcționare. Sistemul experimental a fost realizat cu resurse proprii, a fost montat și testat pe acoperisul Facultății de Inginerie Electrică.

Timpul relativ scurt de “ridicare” a caracteristicilor I - V (1.5-2 sec.) face ca sistemul să poată colecta caracteristicile și în condiții de cer variabil pentru care intensitatea radiației solare înregistrează variații rezonabile (<20-30 W/m²/s). Sistemul colectează date meteo (intensitatea radiației solare, temperatura ambientală) și temperaturile panourilor ceea ce permite o evaluare precisă a variației în timp a acestor mărimi.

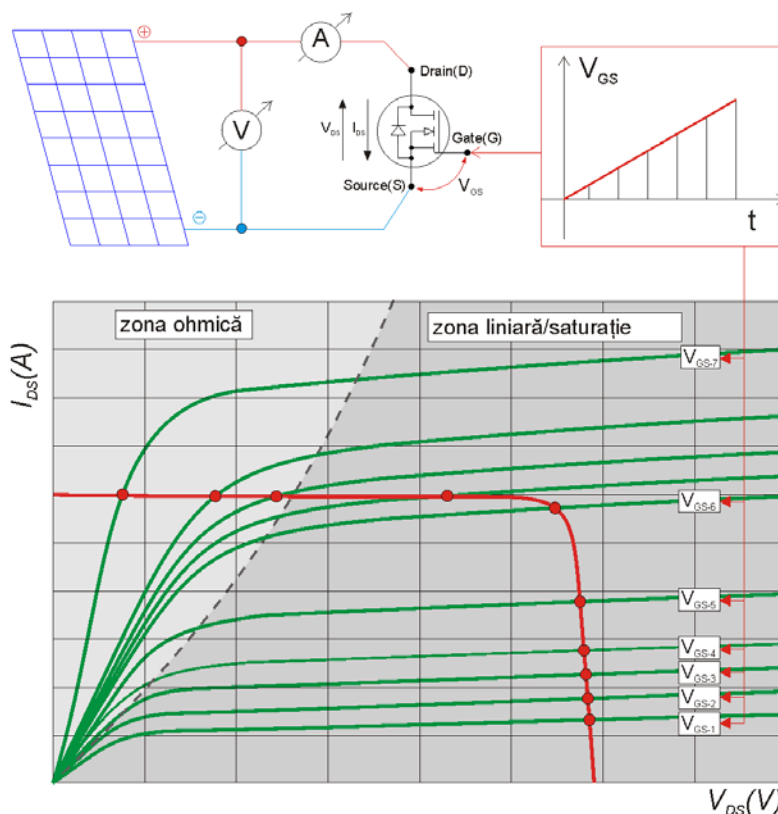


Fig. 8.3.1. Principiul variatorului electronic a rezistenței de sarcină realizat cu tranzistor de tip MOSFET

- Cu linie roșie- caracteristica I-V a celulei fotovoltaice
- Cu linii verzi caracteristicile I-V ale tranzistorului pentru diferite tensiuni de control (V_{GS})

Controlul sistemului este realizat prin intermediul unui software de concepție proprie. Cu ajutorul acestui software sistemul funcționează total autonom asigurând colectarea automată, procesarea și salvarea datelor la intervale de timp prestabilite.

Principalele funcții asigurate de software-ul de control al sistemului sunt:

- Comandă la intervale de timp prestabilite pornirea sistemului de variație a rezistenței de sarcină și a achiziției de date de la senzorii de tensiune și curent. Pornirea acestor două etaje se realizează prin generarea unui puls ce va starta generatorul de pantă (prezentat în capitolul anterior). Colectarea datelor I-V este oprită automat după ce se achiziționează un număr de cca. 10 valori consecutive aproximativ nule (0.01V-0.05V) ale tensiunii de la bornele panoului fotovoltaic. Măsurarea unui set de valori consecutive aproximativ nule ale tensiunii de la bornele panoului fotovoltaic indică faptul că tranzistoarele sunt complet deschise (rezistență de sarcină este minimă) și sistemul a atins punctul de scurt-circuit parcurgând toată caracteristica panoului, de la punctul de de mers în gol ($V=V_{OC}$, $I=0$) până în punctul de scurt-circuit ($V=0$, $I=I_{SC}$);
- Colectează continuu valorile de la senzorii ambientali și de temperatură montați pe panourile fotovoltaice;

- Realizează medierea valorilor de la senzorii ambientali și de temperatură;
- Efectuează scrierea în fișiere, la intervale de timp prestabilite. Fișierele de date ambientale și temperatură includ marcă de timp în format ZZ-LL-HH:MM:SS (Zi-Luna-Oră Minut:Secundă). Fișierele ce conțin datele colectate pentru caracteristicile $I-V$ includ suplimentar și marca de timp (în mili-secunde) a valorilor achiziționate;
- Asigură interfața pentru întreg sistemul experimental prin afișarea diversilor parametri ai sistemului (Fig. 8.4.3):
 - Permite comutarea controlului sistemului de pe mod automat pe mod manual;
 - Asigură vizualizarea (la intervale de 10 sec.) a valorilor mediate ale intensității radiației solare, temperaturii ambientale și temperaturii panourilor.

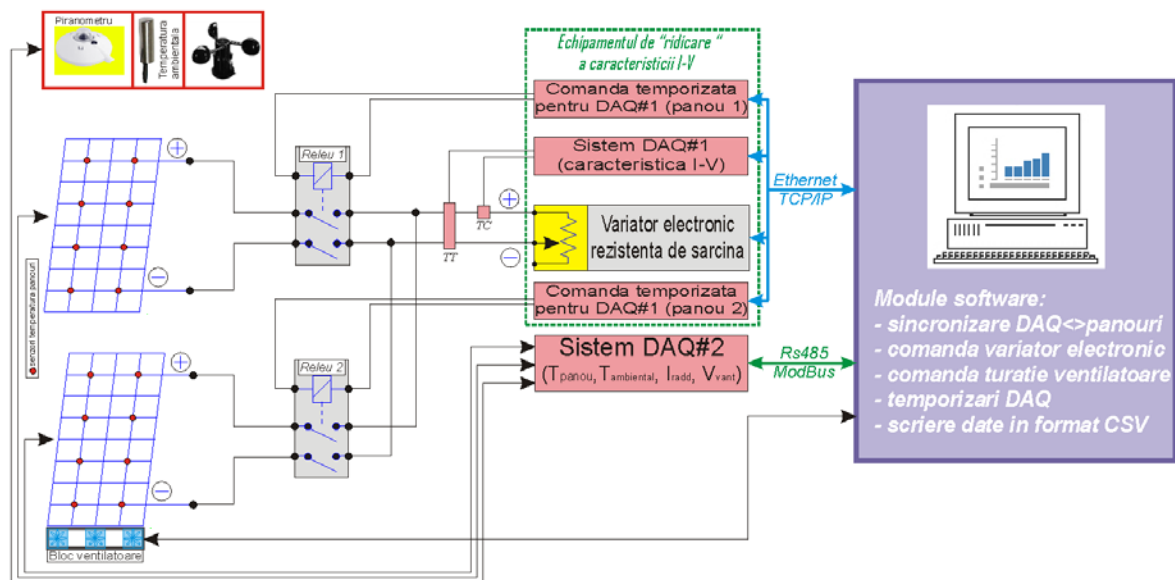


Fig. 8.4.1. Schema funcțională și structura sistemului experimental

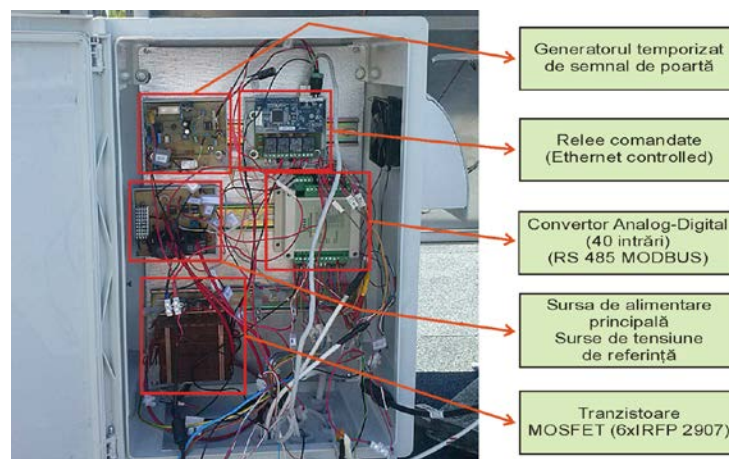


Fig. 8.4.2. Partea electronică a sistemului experimental

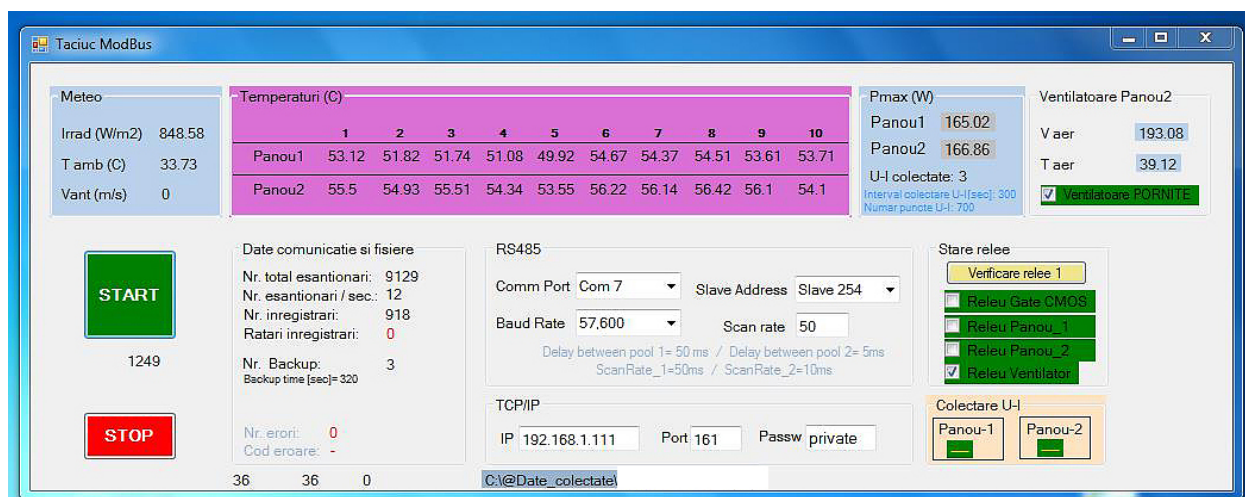


Fig. 8.4.3. Interfața cu sistemul experimental



Imagini cu sistemul experimental instalat pe acoperișul Facultății de Inginerie Electrică

Capitolul 9

Analiza datelor experimentale

În cadrul acestui capitol sunt propuse o serie de criterii de eliminare a datelor eronate și este prezentată modalitatea de procesare a datelor experimentale obținute. Criteriile de „analiză critică” și de procesare a datelor sunt stabilite în mod specific pentru sistemul experimental prezentat în *Capitolul 8*.

Sistemul experimental prezentat în capitolul anterior a permis obținerea unui număr mare de curbe caracteristice valide pentru o gamă foarte largă de condiții de funcționare. În *Anexa V* și *Anexa VI* sunt prezentate spre exemplificare câteva seturi de date experimentale obținute.

În *Fig. 9.1.1.* sunt prezentate câteva din caracteristicile I - V colectate la diferite ore ale aceleiași zile. Din aceste diagrame, se poate observa că sistemul colectează un număr mare de puncte per caracteristică iar timpul relativ scurt al procesului de achiziție (1-2 sec.) face ca sistemul să fie adecvat pentru măsurători chiar și atunci când radiația solară înregistrează variații.

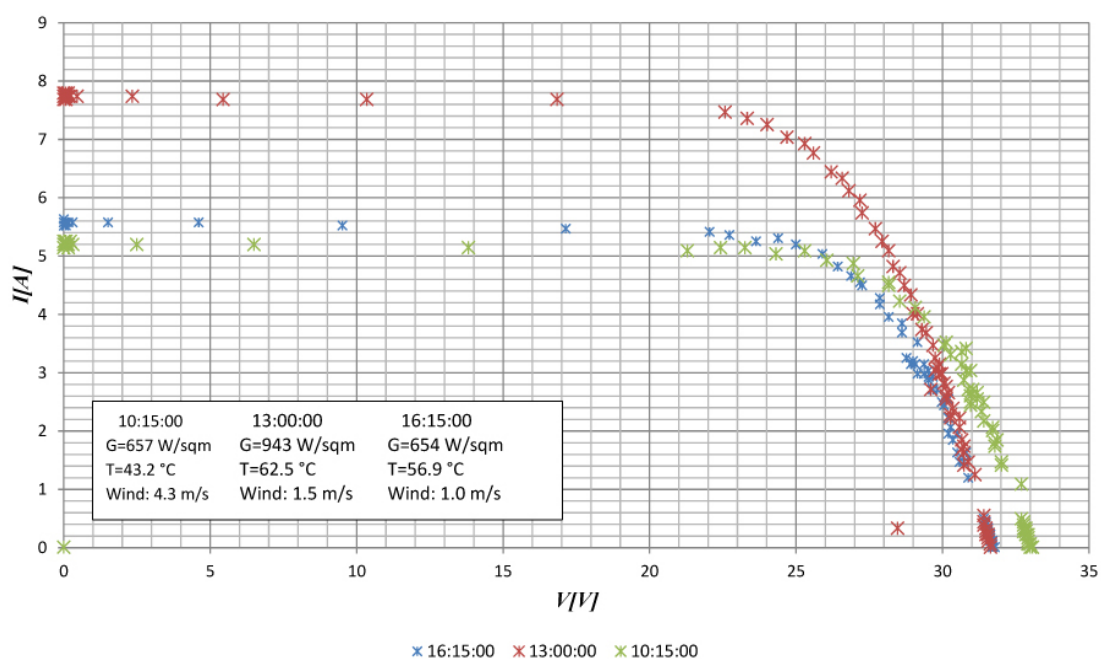


Fig. 9.1.1. Exemplu de caracteristici I-V ridicate la diverse ore ale aceleiași zile

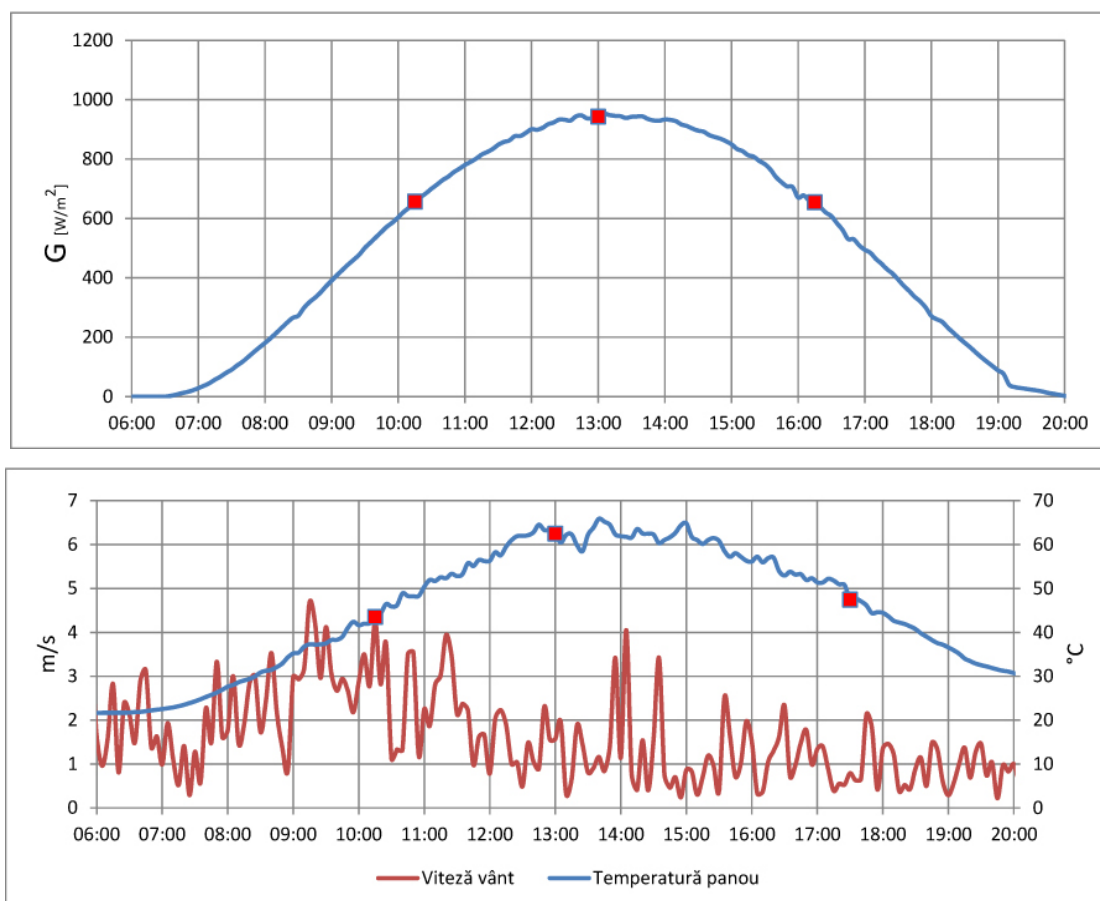


Fig. 9.1.2

(a) Variația intensității radiației solare pe parcursul unei zile (valori mediate la 5 min.)
Punctele marcate cu roșu sunt detaliate în Fig. 9.1.3

(b) Variația temperaturii panoului pe parcursul unei zile (valori mediate la 5 min.)
Punctele marcate cu roșu sunt detaliate în Fig. 9.1.4

Sistemul experimental realizat asigură din construcție o succesiune clară, în timp, a achiziției datelor. Deoarece, prin concepție, sistemul realizează o variație descrescătoare în timp a rezistenței de sarcină, datele colectate într-un set de achiziție trebuie să respecte următoarele monotonii:

- *Tensiunea* Pe durata procesului de “ridicare” a caracteristicii I - V , valoarea tensiunii descrește de la valoarea maximă (V_{oc}) la zero; $V \downarrow [V_{oc}, 0]$;
Se obține astfel un prim criteriu de rafinare al datelor:
Eliminarea valorilor pentru care tensiunea înregistrează variații crescătoare : $(x_i - x_{i+1}) < 0$
- *Curentul* Pe durata procesului de “ridicare” a caracteristicii I - V , valoarea curentului crește de la zero la valoarea maximă (I_{sc}) $I \uparrow [0, I_{sc}]$;
Se obține astfel al doilea criteriu de rafinare al datelor:
Eliminarea valorilor pentru care se înregistrează variații descrescătoare ale valorilor curentului: $(y_i - y_{i+1}) > 0$
- *Suma $I+V$* Acest criteriu rezultă ca și consecință a formei caracteristicii I - V
Suma dintre valoarea tensiunii și valoarea curentului, pentru oricare dintre observații, nu poate fi mai mică decât minimumul dintre valoarea curentului de

scurtcircuit și valoarea tensiunii de mers în gol.

Astfel rezultă al treilea criteriu de rafinare al datelor:

Eliminarea seturilor de date $\{x_i, y_i\}$ pentru care $(x_i+y_i) < \min(I_{sc}, V_{oc})$

- *Medierea valorilor de “capăt”*

Acest criteriu este specific sistemului experimental prezentat în această lucrare. Modul de control și rezoluția convertoarelor ADC (12-bit) determină colectarea unui număr mare de puncte în jurul valorilor de capăt: ($V \approx \max(V), I \approx 0$) și ($V \approx 0, I \approx \max(I)$).

Astfel rezultă al patrulea criteriu de rafinare al datelor care este în același timp și modalitatea de stabilire valorilor pentru I_{sc} și V_{oc} :

Stabilirea valorii curentului de scurt-circuit (I_{sc}) respectiv a valorii tensiunii de funcționare fără sarcină (V_{oc}) se va face prin medierea valorilor de capăt, pe baza unei toleranțe dependente de caracteristicile sistemului experimental (de ex. raportul divizorului de tensiune, rezoluția convertoarelor ADC, etc.).

Eliminare datelor eronate se poate face și pe baza unor metode de evaluare dedicate ce sunt specifice analizei statistice. Analizarea datelor experimentale din punct de vedere al prezenței datelor eronate/aberrante este cunoscută sub denumirea de “analiză critică” a datelor experimentale. Metodele cele mai utilizate pentru “analiză critică” a datelor experimentale sunt: testul Grubbs (testul “ u ”) și testul Romanowski (testul “ t ”) [44][45].

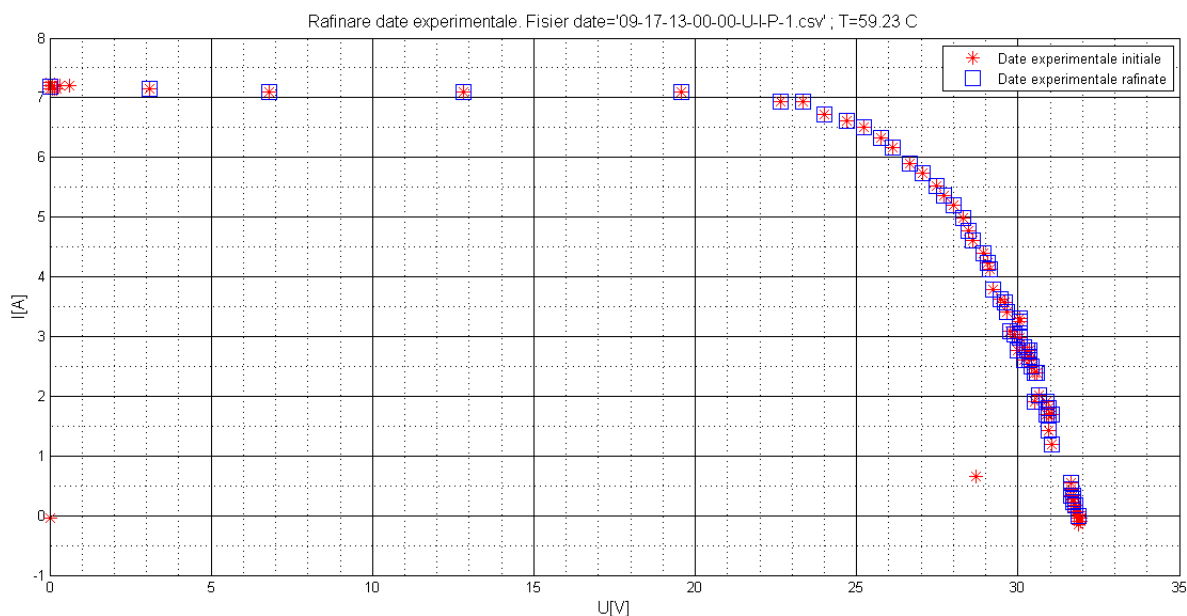


Fig. 9.2.1. Date experimentale după procesul de rafinare
Valorile încadrate în patrate sunt date validate
(Toleranța de rafinare a datelor: $\pm 2.5\%$)

Capitolul 10

Validarea ecuațiilor explicite pe baza datelor experimentale

Acest capitol este destinat evaluării gradului de aproximare, pe baza datelor experimentale, al ecuațiilor explicite propuse în această lucrare.

Scopul este de a verifica și confirma utilitatea acestor ecuații în modelarea datelor experimentale obținute de la sistemele de achiziție destinate “ridicării” . caracteristicilor $I-V$ ale celulelor/panourilor fotovoltaice. În acest capitol este prezentată în mod extins metologia de validare a ecuației explicite (3.2.17) iar în *Anexa VI* sunt prezentate date referitoare la procesul de validare al ecuației (3.3.9).

Pentru validarea ecuației explicite (3.2.17) s-au fost utilizate seturi de date obținute cu sistemul experimental prezentat în *Capitolul 7*.

Validarea ecuației (3.2.17) pe baza datelor experimentale s-a desfășurat în trei etape:

- *Etapa 1.* Determinarea parametrilor m , R_s și R_p pe baza datelor experimentale folosind relația explicită (3.2.17);
- *Etapa 2.* Identificarea unei funcții de tip polinomial pentru aproximarea datelor experimentale;
- *Etapa 3.* Compararea gradului de aproximare obținut cu relația explicită cu gradul de aproximare obținut cu funcția de tip polinomial.

Pentru exemplificare, în acest capitol, sunt prezentate rezultatele simulărilor pentru un set complet de date experimentale. Valorile pentru setul de date experimentale folosite în acest capitol sunt prezentate în *Anexa V*.

În acest capitol se pune în evidență utilitatea datelor obținute, cu sistemul experimental construit, pentru studiul modelelor matematice abordate în acest domeniu.

Capitolul 11

Contribuții originale

În continuare sunt enumerate contribuțiile autorului, aduse în domeniul tezei, în ordinea în care apar în conținutul prezentei lucrări.

Capitolul 2

În acest capitol este propusă și prezentată o abordare originală (nouă în literatura de specialitate) privind rescrierea ecuațiilor caracteristice ale celulelor fotovoltaice într-o formă normalizată. Sunt propuse forme normalizate pentru toate cele trei modele studiate în cadrul lucrării de față.

Formele normalizate propuse prezintă avantaje atât din punct de vedere al simplității relațiilor cât și din punct de vedere al reprezentării grafice a caracteristicilor..

Capitolul 3

În acest capitol este prezentată demonstrația matematică în urma căreia ecuațiile caracteristice ale celulei fotovoltaice sunt convertite din formă implicit-transcendentă într-o formă explicită. Demonstrația are la bază funcția W a lui Lambert și proprietățile acesteia în rezolvarea ecuațiilor de tip transcendent.

Sunt propuse o serie de simplificări ale ecuațiilor explicite. Scopul acestor simplificări fiind cel de a reduce numărul de termeni ai ecuațiilor caracteristice și de a face mult mai ușoară manipularea acestora.

Formele simplificate propuse sunt analizate din punct de vedere al preciziei prin compararea rezultatelor simulărilor numerice obținute pe baza formei inițiale. În urma acestor simulări a rezultat faptul că două dintre formele simplificate propuse au abatere de determinare mai mică de 15ppm. Cea de a treia formă propusă are o abatere de determinare mai mică de 0.2% ceea ce o face suficient de precisă pentru orice tip de evaluări ale caracteristicilor celulelor fotovoltaice.

Capitolul 4

În acest capitol este propus și prezentat un algoritm iterativ foarte rapid și precis pentru calculul valorilor funcției W a lui Lambert (ramura pozitivă). Determinarea valorilor funcției W a lui Lambert este un proces necesar în cazul utilizării formelor explicite ale ecuațiilor caracteristicilor celulelor fotovoltaice.

Pe baza acestui algoritm a fost implementată, în MatLab, o funcție (Q_lambertw) ce asigură procesarea extrem de rapidă și precisă valorilor funcției W a lui Lambert. Evaluarea vitezei de procesare și a preciziei funcțiilor propuse este realizată comparativ cu rezultatele obținute prin utilizarea funcției “lambertw” existentă în pachetul standard de funcții MatLab.

Pe baza funcției propuse (Q_lambertw) a fost dezvoltat un set de funcții MatLab ce asigură procesarea extrem de rapidă a caracteristicilor pentru celulele fotovoltaice. Aceste funcții asigură evaluarea a 1000 de caracteristici, fiecare compusă din 500 de puncte, în mai puțin de 0.5msec. (MatLab R2016a instalat pe o platforma Intel Core-i3-Gen4).

Capitolul 5

În acest capitol sunt propuse și prezentate patru seturi de relații pentru calculul direct (non-iterativ) al coordonatelor punctului de putere maximă pentru modelul cu trei parametri (3P-“modelul ideal”).

Cel puțin două dintre relațiile propuse în această lucrare (5.1.34) (5.1.35) pot fi considerate ca fiind cele mai precise din literatura de specialitate în ceea ce privește determinarea explicit-analitică a coordonatelor punctului de putere maximă pentru modelul cu trei parametri.

Capitolul 6

În acest capitol sunt propuse și prezentate trei seturi de relații pentru calculul direct (non-iterativ) al coordonatelor punctului de putere maximă pentru modelul cu patru parametri (4P).

Dintre relațiile propuse în acest capitol se remarcă relația (6.1.46) care deși are o formă relativ complexă este caracterizată de o eroare relativă în derminarea coordonatei în curent a punctului de putere maximă (pentru modelul cu patru parametri) mai mică de $2 \cdot 10^{-6}$ (2ppm).

Capitolul 7

În acest capitol este propusă o nouă metodă, denumită generic metoda intersecției, de identificare a poziției punctului de putere maximă pe caracteristica tensiune-curent a celulelor fotovoltaice.

Relațiile de calcul obținute prin metoda propusă în acest capitol, asigură o eroare relativă mai mică de 1% pentru estimarea puterii maxime pentru intervalele ce acoperă toate condițiile de operare reale pentru celulele fotovoltaice comerciale (pe bază de siliciu mono sau poli-cristalin) pentru o intensitate a radiației solare mai mare de 200W/m².

Capitolul 8

În acest capitol se face o descriere exhaustivă a unui sistem experimental destinat “ridicării” caracteristicii tensiune-curent pentru panourile fotovoltaice. Descrierea cuprinde detalii legate de principiile care stau la baza unui astfel de sistem, detalii legate de modul de proiectare și calcul al unui sistem electronic de variație a sarcinii cât și detalii legate de execuția acestuia.

Sistemul realizează simultan atât achiziția punctelor caracteristicii tensiune-curent, temperatura de operare a celulelor fotovoltaice cât și achiziția valorilor parametrilor externi de mediu (intensitatea radiației solare, temperatura ambientală și viteza vântului).

Datele colectate au fost centralizate într-o bază de date ce cuprinde o multitudine de caracteristici tensiune-curent pentru o gamă variată de condiții reale de operare a panourilor măsurate.

Capitolul 9

Acest capitol este consacrat descrierii procesului de rafinare a datelor obținute cu sistemul experimental prezentat în această lucrare.

Sunt propuse o serie de criterii de „analiză critică” și de procesare a datelor experimentale obținute, criterii ce sunt stabilite în mod specific pentru sistemul experimental prezentat.

Capitolul 10

În acest capitol este prezentată o metodologie de verificare a unui model matematic cu ajutorul datelor experimentale.

În cadrul acestui capitol este prezentată o modalitate de validare a uneia dintre relațiile explicite prezentată în lucrare. Pentru validare se face o comparație între rezultatele obținute prin aproximarea datelor experimentale pe o curbă de tip polinomial (grad 9) cu rezultatele obținute cu relația propusă spre validare.

În acest capitol se pune în evidență utilitatea datelor obținute, cu sistemul experimental construit, în studiul modelelor matematice abordate în acest domeniu.

Lista relațiilor propuse pentru calculul coordonatelor punctului de putere maximă a celulelor fotovoltaice

	I_{max}	V_{max}
	(5.1.14)a	(5.1.14)b
<i>Modelul 3P</i>	(5.1.18)a	(5.1.18)b
	(5.1.34)a	(5.1.34)b
	(5.1.35)a	(5.1.35)b
	(6.1.31)	(6.1.14)
<i>Modelul 4P</i>	(5.1.35)	(6.1.14)
	(5.1.44)	(6.1.14)
	(5.1.46)	(6.1.14)
<i>Modelul 5P</i>	(7.2.34.a)	(7.2.34.b)

Articole publicate de autor în domeniul tezei de doctorat

M. Taciuc, "An experimental system for measuring the PV panel characteristics curves under real operation conditions," *2016 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*, Bucharest, 2016, pp. 1-6.

M. Taciuc, A. Crăciunescu, "Application of the Lambert W-function for a PV Module Parameters' Estimation", Proceedings of International Conference Of Numerical Analysis And Applied Mathematics - ICNAAM 2016, September 2016, Rhodes, Greece

M. Taciuc, "PV cells I–V characteristic. Explicit equation with three parameters and its simplified forms," *2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, 2017, pp. 709-714.

M. Taciuc, "A new method of estimating the maximum power point coordinates for PV cells, the intersection method," *2018 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*, Bucharest, Romania, 2018, pp. 1-6.

M. Taciuc, "High Accuracy Expressions of the Maximum Power Point Coordinate for Solar Cell Model with Series Resistance," *2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, Romania, 2019, pp. 1-6.

M. Taciuc, "High precision expressions for determining the maximum power point coordinates of the solar cells (Ideal model)" ,U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 81, Iss. 2, 2019 ISSN 2286-3540

Bibliografie

- [1] F. Lasnier, T.G. Ang, "Photovoltaic Engineering Handbook", Taylor & Francis Ltd, ISBN:978-0-852-74311-9
- [2] Gray J.L. A. Luque, Hegedus S., "The Physics of the Solar Cell, în Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", 2nd edition 2011, John Wiley, ISBN: 978-0-470-72169-8
- [3] Martin A. Green, "Solar cells operating principles, technology and system applications", Prentice-Hall series în solid state physical electronics,1982
- [4] William Shockley, "The theory of p-n junctions în semiconductors and p-n junction transistors", Bell Syst. Tech. J., vol. 28, pp. 435-489, July 1949.
- [5] William Shockley, "Transistor technology evokes new physics", Nobel Lecture, December 11, 1956
- [6] F. A. Lindholm, J. G.Fossum, E. L. Burgess "Application of the superposition principle to solar-cell analysis", , IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 26, pp. 165–171, 1979
- [7] Andres Cuevas, "The recombination parameter J_0 ", 4th International Conference on Silicon Photovoltaics, SiliconPV 2014
- [8] Y. P. Varshni, "Temperature dependence of the energy gap în semiconductors", Physica, Volume 34, Issue 1, 1967, Pages 149-154
- [9] N.M. Ravindra, Basudev Prasad, "saturation current în solar cells, An analysis", Solar Cells, Vol.2, 1980, p.109-113, Elsevier
- [10] E. L. Meyer, "Extraction of Saturation Current and Ideality Factor from Measuring Voc and Isc of Photovoltaic Modules", International Journal of Photoenergy, Vol. 2017
- [11] Gerhard Willeke, Eicke Weber, "Advances în Photovoltaics", Part2, Vol.89, , Elsevier Inc., ISBN: 978-0-12-381343-5
- [12] O. Breitenstein, "Understanding the current-voltage characteristics of industrial crystalline silicon solar cells by considering inhomogeneous current distributions", Opto–Electron. Rev., 21, no. 3, 2013
- [13] Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, and Yi-Jie Su, "Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK", Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008 WCECS 2008, 2008, San Francisco, USA
- [14] R.M. Corless, G.H.Gonnet, D.E.G. Hare, D.J.Jeffrey and D.E. Knuth , "On the Lambert W Function", Advances în Computational Mathematics 5(1996)329-359
- [15] Darko Veberic, "Lambert W Function for Applications în Physics", Computer Physics Communications 183 (2012),p. 2622-2628
- [16] M. Bronstein, R. M. Corless, J. H. Davenport, D.J. Jeffrey, " Algebraic properties of the Lambert W function from a result of Rosenlicht and of Liouville", Integral Transforms and Special Functions, Vol. 19, No. 10, October 2008, p. 709–712
- [17] S. R. Valluri, R. M. Corless and D. J. Jeffrey. "Some Applications of the Lambert W Function to Physics", Can. J. Physics 78(9):23-831 (2000)
- [18] Marko Golcnik, "On the Lambert W function and its utility în biochemical kinetics", Biochemical Engineering Journal 63 (2012) 116– 123
- [19] Amit Jain, Avinashi Kapoor, "Exact analytical solutions of the parameters of real solar cells using Lambert W-function", Solar Energy Materials and Solar Cells 2004, 81, 269–277.
- [20] Eric W. Weisstein, "Lambert W-Function.", From MathWorld--A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/LambertWFunction.html>
- [21] MATLAB Function Reference, September 2016, Online version, Revised for Version 9.1 (Release 2016b),The MathWorks, Inc.
- [22] C. Berbente, S. Mitran, S. Zancu, "Metode Numerice", Editura Tehnica, 1997
- [23] A. Hadar, C. Marin, C Petre, A. Voicu, "Metode numerice în inginerie", Politehnica Press, 2004

- [24] T. R. Scavo, J. B. Thoo, "On the geometry of Halley's Method", *The American Mathematical Monthly*, Vol. 102, No. 5 (May, 1995), pp. 417-426
- [25] Toshio Fukushima, "Precise and fast computation of Lambert W-functions without transcendental function evaluations", *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2013, DOI: 10.1016/j.cam. 2012.11.021
- [26] F.N. Fritsch, R.E. Shafer, W.P. Crowley, "Algorithm 443: Solution of the transcendental equation $we^w = x$ ", *Commun. ACM*, 16, (1973) 123-124
- [27] **M. Taciuc**, A. Crăciunescu, "Application of the Lambert W-function for a PV Module Parameters' Estimation", *Proceedings of International Conference Of Numerical Analysis And Applied Mathematics - ICNAAM 2016, September 2016, Rhodes, Greece*
- [28] A. Hoorfar, M. Hassani, "Inequalities on the Lambert W function and hyperpower function", *European Mathematical Information Service* (<http://www.emis.de>), March 2008
- [29] Torbjorn Granlund, "Instruction latencies and throughput for AMD and Intel x86 processors", 2017-04-24, <https://gmlib.org/~tege/x86-timing.pdf>
- [30] Martin A. Green, "Accurate expressions for solar cell fill factors including series and shunt resistances", *Applied physics letters* 108, 081111 (2016)
- [31] **M. Taciuc**, "High precision expressions for determining the maximum power point coordinates of the solar cells (Ideal model)", *U.P.B. Sci. Bull., Series C*, Vol. 81, Iss. 2, 2019 ISSN 2286-3540
- [32] *Symbolic Math Toolbox User's Guide*, www.mathworks.com
- [33] "Methodology and Experimental System for Measuring and Displaying I–V Characteristic Curves of PV Facilities", *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2009; 17:574–586, www.interscience.wiley.com
- [34] S.K. Firth, K.J. Lomas, S.J. Rees, "A simple model of PV system performance and its use in fault detection", *Solar Energy* 84 (2010) 624–635
- [35] E. Durán, J. M. Andújar, J. M. Enrique, and J. M. Pérez-Oria, "Determination of PV Generator I-V/P-V Characteristic Curves Using a DC-DC Converter Controlled by a Virtual Instrument", *2012 International Journal of Photoenergy*
- [36] Liton Kumar Biswas, Md. Habibur Rahman and Saiful Haque, "An Intelligent Characteristics Analyzer of PV Module", *Dhaka Univ. J. Sci.* 61(1): 65-70, 2013 (January)
- [37] Marwan M. Mahmoud, "Transient analysis of a PV power generator charging a capacitor for measurement of the I–V characteristics", *Renewable Energy* 31 (2006) 2198–2206
- [38] E. Duran, M. Piliouguine, M. Sidrach-de-Cardona, J. Galan and J. M. Andujar, "Different methods to obtain the I-V curve of PV modules: A Review", *Proceedings of the 33rd IEEE PVSC, San Diego, CA, 2008*.
- [39] **M. Taciuc**, "An experimental system for measuring the PV panel characteristics curves under real operation conditions," *2016 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), Bucharest, 2016*, pp. 1-6.
- [40] H. Shichman and D. A. Hodges, "Modeling and simulation of insulated-gate field-effect transistor switching circuits", *IEEE J. Solid State Circuits*, SC-3, 1968
- [41] Abdus Sattar, Vladimir Tsukanov, "MOSFETs Withstand Stress of Linear-Mode Operation", Apr 1, 2007, <http://powerelectronics.com/>
- [42] J. Schoiswohl, "Linear Mode Operation and Safe Operating Diagram of Power- MOSFETs", *Application Note V0.92 June 2010, Published by Infineon Technologies AG*
- [43] *International Rectifier, "IRFP2907 datasheet"*, www.irf.com
- [44] Ioan Milosan, "The applying of the Romanowski test for identification of data affected by errors", *European Scientific Journal July 2016 edition vol.12, No.21 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431*
- [45] *Engineering Statistics Handbook, National Institute of Standards and Technology (USA)*, <http://www.itl.nist.gov>