

# **MODELE MATEMATICE PENTRU DISPOZITIVE FOTOVOLTAICE ȘI UTILIZAREA LOR ÎN SISTEME DE CONDUCERE AUTOMATĂ**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
la  
Universitatea "Politehnica" din Timișoara  
în domeniul Ingineria Sistemelor  
de către

**Ing. Flavius-Maxim PETCUȚ**

Conducător științific: prof.univ.dr.ing. Toma-L. DRAGOMIR  
Referenți științifici: prof.univ.dr.ing. Ioan DUMITRACHE  
prof.univ.dr.ing. Emil CEANGĂ  
prof.univ.dr.ing. Virgil TIPONUȚ

Ziua susținerii tezei: 5 martie 2012.

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- |                        |   |
|------------------------|---|
| 1. Automatică          | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie              | 8. Inginerie Industrială                    |
| 3. Energetică          | 9. Inginerie Mecanică                       |
| 4. Ingineria Chimică   | 10. Știința Calculatoarelor                 |
| 5. Inginerie Civilă    | 11. Știința și Ingineria Materialelor       |
| 6. Inginerie Electrică | 12. Ingineria Sistemelor                    |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2006

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,  
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221  
e-mail: editura@edipol.upt.ro



## Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Departamentului de Automatică și Informatică Aplicată al Universității „Politehnica” din Timișoara în intervalul 2008-2012 ca doctorand a cărui activitate de cercetare a fost finanțată prin Proiectului strategic POSDRU 6/1.5/S/13, Proiect ID6998 (2008), cofinanțat din Fondul Social European prin Programul operațional sectorial dezvoltarea resurselor umane 2007-2013.

Odată cu conștientizarea importanței resurselor de energie, a limitărilor unora dintre ele și a creșterii prețului carburanților, a crescut și preocuparea pentru producerea de energie verde. Captarea energiei cu panouri fotovoltaice și utilizarea ei se realizează folosind sisteme cu un nivel de automatizare avansat. De aici apare necesitatea abordării sistemice și sistematice a acestui domeniu. Numeroasele lucrări apărute în literatură se caracterizează prin diversitate și prezentare neunitară, ceea ce îngreunează compararea soluțiilor și standardizarea lor. În acest context teza își propune să pună la dispoziție un suport de tratare unitară sistemică a diferitelor soluții de automatizare, utilizabil și pentru alte tipuri de probleme. Suportul constă în fundamentarea aspectelor referitoare la modelele asociabile caracteristicilor dispozitivelor fotovoltaice, în punerea la dispoziție a unor instrumente de exprimare și investigare sistematică, teoretică și experimentală, și în dezvoltarea, pe această bază, a unor aplicații.

Pe parcursul stagiului doctoral și al elaborării tezei, am primit un sprijin permanent atât în cadrul universității cât și din partea celor apropiați. Doresc să le aduc mulțumiri și pe această cale.

În primul rând țin să mulțumesc conducătorului de doctorat prof. dr. ing. Toma-Leonida DRAGOMIR pentru asistența acordată, indiferent de oră sau zi, în conceperea și realizarea de experimente, lucrări științifice sau capitole din teza de doctorat.

La fel, adresez respectuoase mulțumiri conducătorului lucrării mele de licență șef luc. dr. ing. Sorin NANU, care la rândul său m-a îndrumat inclusiv în perioada doctoratului.

Totodată, le mulțumesc colegilor as. ing. Ana DAN, șef lucr. dr. ing. Adrian KORODI, șef luc. dr. ing. Dorina POPESCU pentru ajutorul moral și științific acordat pentru realizarea unor experimente sau lucrări științifice.

Mulțumesc colectivului de la Catedra de fizică din cadru UPT precum și colectivului de la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca pentru colaborare în realizarea unor experimente sau lucrări științifice.

Mulțumesc, de asemenea, d-lui prof. dr. ing. Ioan SILEA, directorul Departamentului AIA, colectivului Burse doctorale, pentru baza materială pusă la dispoziție, respectiv pentru buna mea încadrare în programul de finanțare.

Nu în ultimul rând, doresc să mulțumesc familiei mele, prietenei mele, precum și grupului de prieteni pentru sprijinul acordat și pentru înțelegerea de care au dat dovadă pe parcursul anilor de doctorat.

Timișoara, februarie 2012

Flavius-Maxim PETCUȚ

PETCUȚ, Flavius-Maxim

**Modele matematice pentru dispozitive fotovoltaice și  
utilizarea lor în sisteme de conducere automată**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 12, Nr. 4, Editura Politehnica,  
2012, 193 pagini, 151 figuri, 31 tabele.

ISSN: 2068-7990

ISBN:978-606-554-457-4

Cuvinte cheie: celulă fotovoltaică, panou fotovoltaic, modele  
parametrice, modele numerice de tip interpolativ, emulator,  
punct de putere maximă (MPP), convertor DC-DC.

**Rezumat**

Teza este axată pe 3 obiective majore:

- 1) sistematizarea, clarificarea și completarea aspectelor privind modelele matematice ale dispozitivelor fotovoltaice și crearea de instrumente utilizabile pentru identificare, comparație și dezvoltare de sisteme de conducere automată;
- 2) realizarea unui emulator de dispozitive fotovoltaice;
- 3) utilizarea modelelor asociate dispozitivelor fotovoltaice pentru conducerea de sisteme cu panouri fotovoltaice și asigurarea funcționării în vecinătatea punctului de putere maximă.

Lucrarea conține atât aspecte de fundamentare teoretică și dezvoltarea de instrumente de lucru, cât și părți experimentale utilizabile în investigații practice.

## CUPRINS

Notații și acronime.....	9
Lista de tabele.....	13
Lista de figuri.....	15
1. INTRODUCERE.....	21
1.1. Celula fotovoltaică.....	21
1.2. Conectarea celulelor fotovoltaice în panouri fotovoltaice.....	23
1.3. Sisteme cu panouri fotovoltaice.....	26
1.4. Obiectivul tezei și conținutul acesteia în contextul cercetărilor referitoare la dispozitivele fotovoltaice și utilizarea acestora fotovoltaice.....	28
2. MODELE PENTRU DISPOZITIVE FOTOVOLTAICE.....	32
2.1. Problematika modelării celulelor și panourilor fotovoltaice.....	32
2.2. Modele bazate pe scheme electrice echivalente.....	34
2.2.1. Modelul cu o diodă (M-1D).....	35
2.2.2. Modelul cu o diodă extins (M-1De).....	37
2.2.3. Modelul cu două diode (M-2D).....	38
2.3. Modele empirice.....	39
2.3.1 Modelul empiric 1 (M-E1).....	40
2.3.2 Modelul empiric 2 (M-E2).....	40
2.3.3 Modelul empiric 3 (M-E3).....	40
2.4. Modele interpolative.....	41
2.5. Extragerea de puncte din modelele caracteristicilor $I(V)$ .....	44
2.6. Determinarea parametrilor modelelor dispozitivelor fotovoltaice.....	49
2.6.1. Estimarea parametrilor modelelor dispozitivelor fotovoltaice folosind algoritmi genetici (EP-AG).....	49
2.6.2. Estimarea parametrilor modelului M-2D folosind algoritmi genetici.....	53
2.6.3. Estimarea parametrilor pentru M-E1 și M-E2.....	54
2.6.4. Estimarea parametrilor pentru M-E3.....	55
2.7. Comparații între metodele de determinare a parametrilor dispozitivelor fotovoltaice pentru diferite modele utilizate.....	55
2.7.1. Rezultate obținute pentru M-2D.....	55
2.7.2. Rezultate obținute pentru M-E1.....	57
2.7.3. Rezultate obținute pentru M-E3.....	59
2.7.4. Sinteza rezultatelor obținute.....	61
3. EMULATOR DE PANOURI FOTOVOLTAICE.....	62
3.1. Problematika emulării panourilor fotovoltaice.....	62
3.2. Schema de emulator propusă și implementarea ei.....	65
3.2.1. Schema și principiul de funcționare.....	65
3.2.2. Modelarea ansamblului generator programabil - sarcină.....	67
3.2.3. Schema bloc informațională a emulatorului.....	73
3.3. Analiza stabilității emulatorului de panouri fotovoltaice (E_PV_P).....	74
3.3.1. Studiul stabilității absolute a E_PV_P.....	75
3.3.2. Analiza stabilității E_PV_P pe baza modelului în timp discret.....	78
3.4. Studiu experimental al emulatorului de panouri fotovoltaice (E_PV_P).....	83
4. DETERMINAREA PE BAZĂ DE MODELE A PUNCTULUI DE PUTERE MAXIMĂ (MPP) PENTRU PANOURILE FOTOVOLTAICE ȘI APLICAȚII.....	104
4.1. Problematika.....	104
4.2. Metode de determinare MPP.....	105
4.2.1. Determinarea MPP folosind diferite modele matematice.....	105
4.2.1.1. Determinarea MPP pentru M-1D.....	105

4.2.1.2. Determinarea MPP pentru M-1De.....	106
4.2.1.3. Determinarea MPP pentru M-2D.....	106
4.2.1.3.1. Stabilirea sistemului de ecuații care furnizează coordonatele MPP...	106
4.2.1.3.2. Sinteza modelului Simulink utilizat pentru determinarea MPP (modelul „Determinare MPP”).....	108
4.2.1.3.3. Exemplificare - rezultate obținute pentru panoul LD 664431.....	109
4.2.1.4. Determinarea MPP pentru M-E1.....	111
4.2.1.5. Determinarea MPP pentru M-E2.....	112
4.2.1.6. Determinarea MPP pentru M-E3.....	112
4.2.2. Determinarea MPP în contextul unor structuri de tip sisteme de reglare extremale.....	112
4.3. Modele de tip interpolativ ale caracteristicilor $I_{MPP}(\theta, G)$ , $V_{MPP}(\theta, G)$ și $P_{MPP}(\theta, G)$ .....	115
4.3.1. Metodă de obținere a modelelor interpolative $I_{MPP}(\theta, G)$ , $V_{MPP}(\theta, G)$ și $P_{MPP}(\theta, G)$ .....	116
4.3.2. Estimarea mărimilor de intrare ale modelelor interpolative (măsurarea indirectă a intensității radiației totale globale - cazul real).....	119
4.3.3. Verificarea funcțiilor de interpolare $I_{MPP}(\theta, G)$ , $V_{MPP}(\theta, G)$ și $P_{MPP}(\theta, G)$ obținute prin metoda de la punctul 4.3.1 folosind caracteristicile determinate prin metoda Tsuno.....	121
4.4. Studiul comportării unor sisteme de conducere cu mărimi de referință generate prin interpolare.....	124
4.4.1. Convertorul Buck.....	124
4.4.2. Convertorul Boost.....	134
4.4.3. Analiza comportării unei structuri de reglare a tensiunii de la bornele unui panou fotovoltaic folosind referința de tensiune obținută prin interpolare.....	141
5. CONCLUZII.....	146
5.1. Rezultate.....	146
5.2. Contribuții personale.....	150
5.3. Direcții de dezvoltare și cercetare generate de teză .....	152
ANEXE.....	153
Anexa 2.1. Codul sursă pentru extragerea parametrilor cu ajutorul algoritmilor genetici.....	154
Anexa 3.1. Utilizarea blocului Lookup-Table din cadrul mediului Matlab-Simulink pentru emularea unei caracteristici $I(V)$ a unui dispozitiv fotovoltaic.....	161
Anexa 3.2. Experimente cu o sursă programabilă - completare la experimentele prezentate în paragraful 3.2.2. ....	165
Anexa 3.3. Experimente cu o sursă programabilă - completare la paragraful 3.4. ....	168
Anexa 3.4. Experimente cu două surse programabile - completare la paragraful 3.4. ....	171
Anexa 3.5. Experimente cu o sursă programabilă - cu compensator - completare la paragraful 3.4.....	172
Anexa 4.1. Estimarea intensității radiației solare și a temperaturii în funcție de poziția panoului .....	175
Anexa 4.2. Aplicarea metodei de interpolare Tsuno.....	178

Anexa 4.3. Caracteristici de comandă aferente Scenariului 2 (schema din Fig. 4.4-4 și panou cu caracteristicile externe din Fig. 4.4-9).....	182
Anexa 4.4 Caracteristici de comandă aferente Scenariului 4 (schema din Fig. 4.4-16 și panou cu caracteristicile externe din Fig. 4.4-9).....	184
Bibliografie.....	186



## NOTAȚII ȘI ACRONIME

$AG$	- Metodă algoritimi genetici
$a$	- Eroarea de reglare a regulatorului PI cu măsură ARW
$b$	- Parametru corespunzător M-E2
$C_1, C_2$	- Condensatoare
$c_i$	- Valoare de sprijin cunoscută (Interpolare Shepard)
$c_k$	- Ponderele fiecărui individ în calculul fitness-ului
$D, D_1, D_2$	- Diode din schemele electrice echivalente corespunzătoare modelelor M-1D, M-1De și M-2D
$DC-DC$	- Curent cunștinu-curent cunștinu (referitor la convertoare)
$EP$	- Estimare parametri
$F_{ID}(V), F_{ID}(V), F_{ID}(V)$	- Caracteristicile diodelor $D, D_1$ și $D_2$
$fit$	- Valoarea funcției fitness
$V = F_L(I)$	- Caracteristica sarcinii (2.2-1)
$G, G_{dir}, G_{diff}$	- Intensitatea radiației solare - la nivelul dispozitivului fotovoltaic (celulă/panou), directe, difuze.
$\hat{G}_{PV\_P}$	- Estimata radiației solare la nivelul dispozitivului fotovoltaic (celulă/panou)
$GA1, GA2, GA3$	- Funcții fitness
$h$	- Pas de discretizare a timpului (pentru sisteme în timp discret)
$h_{dS}$	- Pasul de discretizare a timpului corespunzător sursei de tensiune programabilă
$\bar{I}, I$	- Intensitatea curentului electric - valoare medie, respectiv valoare momentană
$I(V)$	- Caracteristica $I(V)$ pentru dispozitivul fotovoltaic, numită și caracteristică externă
$I_D, I_{D1}, I_{D2}$	- Curentul prin dioda $D, D_1$ și $D_2$
$I_{E\_PV\_P}$	- Curentul de la ieșirea emulatorului
$I_{MPP}, P_{MPP}, V_{MPP}$	- Curentul, puterea și tensiunea corespunzătoare MPP
$\hat{I}_{MPP}, \hat{P}_{MPP}, \hat{V}_{MPP}$	- Estimate ale curentului, puterii și tensiunii corespunzătoare MPP
$I_{OC}, I_{SC}$	- Curentul de mers în gol, respectiv curentul de scurtcircuit, ai unei celule sau panou fotovoltaic
$I_{PV\_P}$	① Curentul de la ieșirea panoului fotovoltaic ② Curentul de la intrarea modelului de tip interpolativ al panoului fotovoltaic
$I_{ph}$	- Curentul corespunzător sursei ideale de curent asociată celei sau panoului fotovoltaic

$I_{RL}$	- Curentul de sarcină
$I_{RL}^*$	- Valoarea măsurată a curentului de sarcină
$I_d$	- Curentul prin bobină
$I_o$	- Curent - Soluția ecuației (2.5-4)
$I_{mas}$	- Vectorul valorilor curentului măsurat ( $I_{mas} = (I_{1\_mas}, I_{2\_mas}, \dots, I_{j\_mas})$ )
$I_{max}$	- Curentul maxim generat de sursa de tensiune
$I_{sat}$	- Parametru corespunzător M-E1
$I_{x\_mas}$	- Curentul corespunzător MPP utilizat pentru M-E3, determinat cu aproximație de pe caracteristica măsurată
$I_{0}, I_{01}, I_{02}$	- Parametru, cu dimensiunea curent, al modelelor M-1D, M-1De și M-2D
$j$	- Numărul de perechi de măsurători disponibile în tabel
$K_P, K_I$	- Amplificările regulatorului PI cu limitare ARW
$k$	① Constanta Boltzmann $k=1,380 \cdot 10^{-23} [J \cdot K^{-1}]$ ② Indice sau rang în enumerări de forma $k = \overline{1, j}$ ③ Timp normalizat raportat la pasul de discretizare în cazul algoritmilor de reglare în timp discret
$k_e$	- Parametru corespunzător M-E3
$L$	- Inductanță
$M-1D$	- Model matematic bazat pe schemă electrică echivalentă cu o diodă
$M-1De$	- Model matematic bazat pe schemă electrică echivalentă cu o diodă extins
$M-2D$	- Model matematic bazat pe schemă electrică echivalentă cu două diode
$M-E1$	- Model empiric 1
$M-E2$	- Model empiric 2
$M-E3$	- Model empiric 3
$Math$	- Metodă Mathcad
$MPP$	- Punctul de putere maximă asociat unei caracteristici externe (Maximum Power Point)
$minerr( )$	- Funcție Mathcad de minimizare a erorii
$N_{max}$	- Numărul maxim de generații
$n, n_1, n_2$	- Factori de idealitate pentru diodele din modelele M-1D, M-1De și M-2D
$P$	- Putere
$P(V)$	- Caracteristica $P(V)$ pentru dispozitivul fotovoltaic (celulă/panou)
$P_A$	- Părintele „A” utilizat în cadrul încrucișării
$P_B$	- Părintele „B” utilizat în cadrul încrucișării
$P_M$	- Părintele utilizat în cadrul mutației
$PV\_C$	- Celulă fotovoltaică (Photovoltaic cells)
$PV\_P$	- Panou fotovoltaic (Photovoltaic panel)
$PV\_P_1$	- Panou fotovoltaic de tip LD 664431
$PV\_P_2$	- Panou fotovoltaic de tip ASE 30-DG-UT-68V/32W
$\rho$	- Plaja față de parametrii individuali inițiali în care sunt obținuți parametrii indivizilor generației inițiale
$\bar{\rho}$	- Vector care indică orientarea unui panou fotovoltaic



$q$	① Sarcina elementară a electronului $q=1,602 \cdot 10^{-19}$ [C] ② Numărul de indivizi dintr-o generație în cazul folosirii algoritmilor genetici
$R_C$	- Rezistența legată în serie cu condensatorul $C_1$
$R_{L1}, R_{L2}$	- Rezistență de sarcină, respectiv tensiunea de la bornele ei și curentul prin ea
$V_L - V_{R_L}, I_L$	
$- I_{R_L}$	
$R_P, R_S$	- Rezistența conectată în paralel, respectiv serie
$R_{11}, R_2$	- Rezistențele divizorului de tensiune utilizat pentru adaptarea semnalului $V_S$ la intrarea ADC a plăcii dSPACE.
$R_{Se}$	- Parametru corespunzător M-E1 și M-E2
$R_{Sh}$	- Shuntul pentru măsurarea curentului
STC	- Condiții standard de test (Standard Test Conditions)
$T$	- Temperatură de lucru a diodei D exprimată în $^{\circ}K$
$T_D, T_1$	- Constatele blocului compensator din Fig. 3.4-23.
$T_P$	- Constanta de timp a sursei programabile în aproximarea ei ca bloc $PT_1$
$T_R$	- Constanta de timp a filtrului curentului măsurat
$T_{temp}$	- Constanta de timp a ecuației diferențiale (2.5-1)
$U$	- Semnal rampă utilizat pentru identificarea ansamblului sursă programabilă - sarcină
$U_{C1}(t)$	- Tensiunea pe condensatorul $C_1$
$u, \tilde{u}_0, \tilde{u}$	- Semnal de comandă care asigură comanda factorului de umplere al regulatorului - valoarea factorului de umplere, valoarea amplitudinii semnalului transmis convertorului
$u_{min}, u_{max}$	- Pragurile de setare ale blocului ARW
$\bar{V}, V$	- Tensiunea - valoare medie, respectiv valoare momentană
$\bar{V}_{IN}, V_{IN}$	- Tensiunea de intrare în convertorul DC-DC - valoare medie, respectiv valoare momentană
$V_{OC}, V_{SC}$	- Tensiunea de mers în gol, respectiv tensiunea de scurtcircuit, ale unei celule sau panou fotovoltaic
$\bar{V}_{OUT}, V_{OUT}$	- Tensiunea de ieșire din convertorul DC-DC - valoare medie, respectiv valoare momentană
$V_{PV\_P}$	① Tensiunde de la bornele panoului fotovoltaic ② Tensiunde de la ieșirea modelului interpolativ al panoului fotovoltaic
$V_{PV\_P}^*$	- Semnalul de comandă al sursei de tensiune cod serial RS-232
$V_{R_L}$	- Tensiunea de pe rezistorul de sarcină $R_L$
$V_{R_L}^*$	- Tensiunea măsurată de convertorul ADC al plăcii dSPACE
$V_S$	- Tensiunea de la ieșirea sursei programabile
$V_S^*$	- Semnalul de comandă a sursei programabile
$V_T, V_{T1}, V_{T2}$	- Parametru de caracterizare a influenței temperaturii asupra efectelor neliniare de tip diodă din modelele M-1D, M-1De, M-2D

$V_{mas}$	- Vectorul valorilor tensunii măsurate ( $V_{mas} = (V_{1\_mas}, V_{2\_mas}, \dots, V_{j\_mas})$ )
$V_{max}$	- Tensiunea maximă generată de sursa de tensiune
$V_o$	- Tensiunea corespunzătoare curentului $I_o$ - soluție a ecuației (2.5-4)
$V_{x\_mas}$	- Tensiunea corespunzătoare MPP determinat cu aproximație de pe caracteristica măsurată utilizat pentru M-E3
$v$	- Semnal pentru obținerea caracteristicii $I(V)$
$w_i$	- Ponderea asociată punctului de sprijin completat (Interpolare Shepard)
$Z_i$	- Zona descendent utilizată în cadrul selecției încrucișate
$Z_{pi}$	- Procentul în care poate varia descendentul obținut prin încrucișare intermediară cu ajutorul căruia se obține $Z_i$
$Z_{pm}$	- Procentul în care poate varia descendentul obținut prin mutație cu ajutorul căruia se obține $Z_m$
$Z_m$	- Zona descendent utilizată în cadrul mutației
$a$	- Numărul celor mai performanți indivizi păstrați de la o generație la alta
$\beta$	- Numărul descendenților obținuți prin încrucișare
$\gamma$	- Numărul descendenților obținuți prin mutație
$\theta, \theta_{air}$	- Temperatura - de lucru a dispozitivului fotovoltaic (celulă/panou), ambientală
$\hat{\theta}_{PV\_P}$	- Estimare a temperaturii de lucru a dispozitivului fotovoltaic (celulă/panou)
$\varepsilon_I, \bar{\varepsilon}_I$	- Eroarea, eroarea medie a curentului emulat
$\varepsilon_V, \varepsilon_{Vmin}, \varepsilon_{Vmax}, \bar{\varepsilon}_V$	- Eroarea pentru tensiunea emulată – valoare momentană, valoare minimă, valoare maximă, valoare medie
$\varepsilon$	- Prag pozitiv de valoare foarte mică cu scopul de a evita oscilațiile de calcul
$\sigma(\cdot)$	- Semnal treaptă unitate
$\tau_p$	- Timp mort (întârzierea sursei de tensiune în preluarea comenzii)
$\mu$	- Distanța dintre locurile de sprijin (Interpolare Shepard)

## LISTĂ DE TABELE

<i>Tabelul</i>	<i>Pag.</i>
<b>Tabelul 1.2-1:</b> Tipuri de panouri fotovoltaice oferite pe piață.....	24
<b>Tabelul 2.6-1:</b> Organizarea datelor experimentale.....	50
<b>Tabelul 2.7-1:</b> Vectorii $V_{k\_mas}$ , $I_{k\_mas}$ corespunzători caracteristicilor experimentale.....	56
<b>Tabelul 2.7-2:</b> Parametrii estimați pentru M-2D utilizând algoritmi genetici.....	56
<b>Tabelul 2.7-3:</b> Parametrii identificați pentru M-E1.....	58
<b>Tabelul 2.7-4:</b> Parametrii determinați pentru ME-3.....	60
<b>Tabelul 2.7-5:</b> Sinteza rezultatelor obținute.....	61
<b>Tabelul 3.1-1:</b> Sinteza metodelor de realizare a emulatorului.....	65
<b>Tabelul 3.4-1:</b> Experimente de tip B: Răspunsul emulatorului la variații ale semnalelor $\theta(t)$ și $G(t)$ . <i>Emulatorul alimentează o rezistență de sarcină constantă (<math>R_L \approx 8 \Omega</math>).....</i>	87
<b>Tabelul 3.4-2:</b> Experimente de tip C: Răspunsul emulatorului la variații ale rezistenței de sarcină $R_L$ (mărimile de intrare $\theta$ și $G$ sunt constante, $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , $G = 600 \text{ W/m}^2$ ).....	93
<b>Tabelul 4.3-1:</b> Valori ale $I_{MPP}$ , $V_{MPP}$ , $P_{MPP}$ determinate în cadrul etapei II pentru diferite valori ale $\theta$ și $G$ .....	117
<b>Tabelul 4.3-2:</b> Grila incompletă pentru $I_{MPP}$ .....	117
<b>Tabelul 4.3-3:</b> Grila completă pentru $I_{MPP}$ .....	118
<b>Tabelul 4.3-4:</b> Grila completă pentru $V_{MPP}$ .....	118
<b>Tabelul 4.3-5:</b> Grila completă pentru $P_{MPP}$ .....	118
<b>Tabelul 4.3-6:</b> Grilă extinsă pentru $I_{MPP}$ .....	118
<b>Tabelul 4.3-7:</b> Grilă extinsă pentru $V_{MPP}$ .....	119
<b>Tabelul 4.3-8:</b> Grilă extinsă pentru $P_{MPP}$ .....	119
<b>Tabelul 4.3-9:</b> Grila completă pentru $I_{MPP}$ prin metoda Tsuno și prin metoda din paragraful 4.3.1.....	122
<b>Tabelul 4.3-10:</b> Grila completă pentru $V_{MPP}$ prin metoda Tsuno și prin metoda din paragraful 4.3.1.....	122
<b>Tabelul 4.3-11:</b> Grila completă pentru $P_{MPP}$ prin metoda Tsuno și prin metoda din paragraful 4.3.1.....	123
<b>Tabel A3.1-1:</b> Lookup Table (3-D)	
a) Punctele de sprijin ale caracteristicilor $V_{PV\_P}(\theta, G, I_{PV\_P})$ pentru $\theta = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	163
b) Punctele de sprijin ale caracteristicilor $V_{PV\_P}(\theta, G, I_{PV\_P})$ pentru $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	163
c) Punctele de sprijin ale caracteristicilor $V_{PV\_P}(\theta, G, I_{PV\_P})$ pentru $\theta = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	164
d) Punctele de sprijin ale caracteristicilor $V_{PV\_P}(\theta, G, I_{PV\_P})$ pentru $\theta = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	164
<b>Tabelul A4.1-1:</b> Valorile utilizate de în [Perez 1990] pentru calcularea $F_a$ și $F_b$ .....	176
<b>Anexa 4.3 Caracteristici de comandă aferente Scenariului 2 (schema din Fig. 4.4-4 și panou cu caracteristicile externe din Fig. 4.4-9)</b>	
<b>Tabel A.4.3-1:</b> $G=400 \text{ W/m}^2$ , $\theta=25 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	182
<b>Tabel A.4.3-2:</b> $G=600 \text{ W/m}^2$ , $\theta=25 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	182
<b>Tabel A.4.3-3:</b> $G=800 \text{ W/m}^2$ , $\theta=25 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	182
<b>Tabel A.4.3-4:</b> $G=1000 \text{ W/m}^2$ , $\theta=25 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	183

**Anexa 4.4 Caracteristici de comandă aferente Scenariului 4 (schema din Fig. 4.4-16 și panou cu caracteristicile externe din Fig. 4.4-9)**

<b>Tabel A.4.4-1:</b> $G=400 \text{ W/m}^2, \theta=25 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	184
<b>Tabel A.4.4-2:</b> $G=600 \text{ W/m}^2, \theta=25 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	184
<b>Tabel A.4.4-3:</b> $G=800 \text{ W/m}^2, \theta=25 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	185
<b>Tabel A.4.4-4:</b> $G=1000 \text{ W/m}^2, \theta=25 \text{ }^\circ\text{C}$ .....	185

## LISTĂ DE FIGURI

<i>Figura</i>	<i>Pag.</i>
Fig. 1.1-1. Celula fotovoltaică [wiki 2011].....	21
Fig. 1.1-2. Circuit celulă fotovoltaică – rezistență de sarcină $R_L$ .....	21
Fig. 1.1-3. Caracteristica $I(V)$ pentru o celulă fotovoltaică.....	22
Fig. 1.1-4. (1)- caracteristica $I(V)$ , (2)- caracteristica $P(V)$ ale celulei fotovoltaice.....	22
Fig. 1.2-1. Structura unui panou cu celule conectate în serie.....	23
Fig. 1.2-2. Structura unui panou cu celule conectate în paralel.....	24
Fig. 1.2-3. Structura unui panou cu diode de By-Pass.....	26
Fig. 1.3-1. Variante de sisteme cu panouri fotovoltaice.....	27
Fig. 1.3-2. Sistem fotovoltaic autonom (structură generică).....	28
Fig. 2.1-1. Stabilirea punctului de funcționare al unui dispozitiv fotovoltaic.....	33
Fig. 2.1-2. Familii de caracteristici $I(V)$ pentru diferite intensități ale radiației solare $G$ și temperaturi ale celulei/panoului $\theta$ [Tafticht 2008].....	34
Fig. 2.2-1. Ansamblul celulă – circuit de sarcină utilizat în modelarea matematică.....	35
Fig. 2.2-2. Model simplu cu o diodă (M-1D).....	36
Fig. 2.2-3. Scheme bloc ale celulelor și panourilor fotovoltaice.....	37
Fig. 2.2-4. Model cu o diodă extins (M-1De).....	37
Fig. 2.2-5 Model extins cu două diode (M-2D).....	38
Fig. 2.4-1. Metoda de interpolare din [Marion 2004].....	42
Fig. 2.4-2. Metoda Tsuno de obținere a unei caracteristici externe - schemă bloc de interpolare.....	43
Fig. 2.5-1. Schema Simulink atașată modelului (2.5-1).....	46
Fig. 2.5-2. Schema Simulink pentru obținerea prin puncte a caracteristicii $I(V)$ - <i>Generare caracteristică <math>I(V)</math></i> .....	46
Fig. 2.5-3. Semnalul de intrare aplicat conform schemei din Fig. 2.5-2.....	47
Fig. 2.5-4. Răspunsul sistemului din Fig. 2.5-2 la semnalul de intrare din Fig. 2.5-3.....	47
Fig. 2.5-5. Caracteristica $I(V)$ calculată cu modelul M-2D cu parametrii: $I_{ph}=0.453\text{ A}$ , $I_{01}=12.5\cdot 10^{-11}\text{ A}$ , $I_{02}=25\cdot 10^{-9}\text{ A}$ , $R_s=0.3\ \Omega$ , $R_p=47.7\ \Omega$ , $V_{T1}=25.7\cdot 10^{-3}\text{ V}$ și $V_{T2}=51.4\cdot 10^{-3}\text{ V}$ .....	48
Fig. 2.5-6. Schema Simulink atașată modelului (2.5-5).....	48
Fig. 2.6-1. Ordinograma metodei de determinare a parametrilor modelului matematic al unui dispozitiv fotovoltaic folosind algoritmi genetici.....	51
Fig. 2.6-2. Zonă descendent „încrușare intermediară”.....	53
Fig. 2.6-3. Zonă descendent „mutație”.....	53
Fig. 2.7-1 $I(V)$ , $P(V)$ : PV_P1-EP-AG-2D-GA1, PV_P1-EP-AG-2D-GA2, PV_P1-EP-AG-2D-GA3.....	57
Fig.2.7-2. $I(V)$ , $P(V)$ : PV_P2-EP-AG-2D-GA1, PV_P2-EP-AG-2D-GA2, PV_P2-EP-AG-2D-GA3.....	57
Fig. 2.7-3. $I(V)$ , $P(V)$ : PV_P1-EP-AG-E1-GA1, PV_P1-EP-AG-E1-GA2, PV_P1-EP-AG-E1-GA3, PV_P1-EP-Math-E1.....	58
Fig. 2.7-4. $I(V)$ , $P(V)$ : PV_P2-EP-AG-E1-GA1, PV_P2-EP-AG-E1-GA2, PV_P2-EP-AG-E1-GA3, PV_P2-EP-Math-E1.....	59
Fig. 2.7-5. $I(V)$ , $P(V)$ : PV_P1-EP-AG-E3-GA1, PV_P1-EP-AG-E3-GA2, PV_P1-EP-AG-E3-GA3, PV_P1-EP-Math-E3.....	60
Fig.2.7-6. $I(V)$ , $P(V)$ : PV_P2-EP-AG-E3-GA1, PV_P2-EP-AG-E3-GA2, PV_P2-EP-AG-E3-GA3, PV_P2-EP-Math-E3.....	60

Fig. 3.1-1. Schema de principiu pentru E_PV_P-convertor DC-DC.....	63
Fig. 3.1-2. O schema de E_PV_P- cu rezistor programabil.....	64
Fig. 3.1-3. Schema de principiu pentru E_PV_P-sursă programabilă.....	65
Fig. 3.2-1. Schema de principiu a emulatorului.....	65
Fig. 3.2-2. Schema bloc a emulatorului - varianta cu filtrarea curentului măsurat.....	67
Fig. 3.2-3. Schema bloc a filtrului curentului măsurat.....	67
Fig. 3.2-4. Schema de principiu pentru identificarea ansamblului sursă programabilă – sarcină.....	68
Fig. 3.2-5. Implementarea Simulink pe modul dSpace a schemei din Fig. 3.2-4.....	69
Fig. 3.2-6. Înregistrări ale semnalelor $U$ , $V_S^*$ , $V_S$ în cazul discretizării semnalului cu pasul de 1 secundă ( $h_{dS} = 1$ secundă).....	70
Fig. 3.2-7. Înregistrări ale semnalelor $U$ , $V_S^*$ , $V_S$ în cazul discretizării semnalului cu pasul de 3 secunde ( $h_{dS} = 3$ secunde).....	70
Fig. 3.2-8. Înregistrări ale semnalelor $U$ , $V_S^*$ , $V_S$ în cazul discretizării semnalului cu pasul de 5 secunde ( $h_{dS} = 5$ secunde).....	71
Fig. 3.2-9. Înregistrări ale semnalelor $U$ , $V_S^*$ , $V_S$ în cazul discretizării semnalului cu pasul de 5 secunde ( $h_{dS} = 5$ secunde) - zoom.....	71
Fig. 3.2-10. Înregistrări ale semnalelor $U$ , $V_S^*$ , $V_S$ în cazul discretizării semnalului cu pasul de 5 secunde ( $h_{dS} = 5$ secunde) - zoom.....	72
Fig. 3.2-11. Schema bloc a E_PV_P – varianta timp continuu.....	73
Fig. 3.2-12. Schema bloc a E_PV_P – varianta timp discret fără timp mort - caz A.....	74
Fig. 3.2-13. Schema bloc a E_PV_P - varianta timp discret cu timp mort - caz B.....	74
Fig. 3.3-1. Schema bloc a E_PV_P în timp continuu modificată.....	75
Fig. 3.3-2. Schema bloc a E_PV_P în timp continuu – varianta cu abateri de curent și tensiune.....	76
Fig. 3.3-3. Schemă bloc preliminară pentru analiza stabilității folosind criteriul Popov.....	76
Fig. 3.3-4. Schemă bloc utilizată pentru analiza stabilității folosind criteriul Popov.....	77
Fig. 3.3-5. Sectorul de stabilitate absolută în cazul aplicării criteriului Popov.....	77
Fig. 3.3-6. Schemă bloc utilizată pentru analiza stabilității folosind criteriul Tâpkin – caz A.....	79
Fig. 3.3-7. Locul de transfer $H(e^{j\omega h})$ al blocului liniar – caz A.....	80
Fig. 3.3-8. Sectorul de stabilitate absolută în cazul aplicării criteriului Tâpkin.....	80
Fig. 3.3-9. Domeniul ocupat de caracteristicile externe.....	81
Fig. 3.3-10. Schemă bloc utilizată pentru analiza stabilității folosind criteriul Tâpkin – caz B.....	82
Fig. 3.3-11. Locul de transfer $H(e^{j\omega h})$ al blocului liniar - caz B.....	83
Fig. 3.4-1. Schema implementată pe modulul dSpace pentru cazul „emulator fără bloc compensator”.....	84
Fig. 3.4-2. Realizarea fizică a schemei din Fig. 3.4-1.....	85
Fig. 3.4-3. Punctele obținute pentru a) $\theta=10$ °C; b) $\theta=25$ °C.....	86
Fig. 3.4-4. Evoluția erorii $\mathcal{E}_V$ și a erorii medii $\bar{\mathcal{E}}_V$ pentru a) $\theta=10$ °C; b) $\theta=25$ °C.....	87
Fig. 3.4-5. Experimentul B1. $\theta = 25$ °C, $G =$ variabil, $R_L \approx 8 \Omega$ , $T_R = 0.5$ secunde.....	88
Fig. 3.4-6. Experimentul B2. $\theta =$ variabil, $G = 600$ W/m <sup>2</sup> , $R_L \approx 8 \Omega$ , $T_R = 0.5$ secunde....	89
Fig. 3.4-7. Experimentul B3. $\theta = 25$ °C, $G =$ variabil, $R_L \approx 8 \Omega$ , $T_R = 0.5$ secunde.....	90

Fig. 3.4-8. Experimentul B4. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = \text{variabil}$ , $R_L \approx 8\ \Omega$ , $T_R = 0.03125$ secunde.....	91
Fig. 3.4-9. Experimentul B5. $\theta = \text{variabil}$ , $G = 600\ \text{W/m}^2$ , $R_L \approx 8\ \Omega$ , $T_R = 0.03125$ secunde.....	92
Fig. 3.4-10. Experimentul B6. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = \text{variabil}$ , $R_L \approx 8\ \Omega$ , $T_R = 0.03125$ secunde.....	93
Fig. 3.4-11. Experimentul C1. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\ \text{W/m}^2$ , incrementare $R_L \in [10, 20]\ \Omega$ , $T_R = 2$ secunde.....	95
Fig. 3.4-12. Experimentul C2. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\ \text{W/m}^2$ , decrementare $R_L \in [20, 10]\ \Omega$ , $T_R = 2$ secunde.....	96
Fig. 3.4-13. Experimentul C3. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\ \text{W/m}^2$ , scurtcircuitare $R_L \in \{10, 35\}\ \Omega$ , $T_R = 2$ secunde.....	97
Fig. 3.4-14. Experimentul C4. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\ \text{W/m}^2$ , incrementare $R_L \in [10, 20]\ \Omega$ , $T_R = 1$ secunde.....	97
Fig. 3.4-15. Experimentul C5. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\ \text{W/m}^2$ , decrementare $R_L \in [20, 10]\ \Omega$ , $T_R = 1$ secunde.....	98
Fig. 3.4-16. Experimentul C6. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\ \text{W/m}^2$ , scurtcircuitare $R_L \in \{10, 35\}\ \Omega$ , $T_R = 1$ secunde.....	99
Fig. 3.4-17. Experimentul C7. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\ \text{W/m}^2$ , incrementare $R_L \in [10, 20]\ \Omega$ , $T_R = 0.5$ secunde.....	99
Fig. 3.4-18. Experimentul C8. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\ \text{W/m}^2$ , decrementare $R_L \in [20, 10]\ \Omega$ , $T_R = 0.5$ secunde.....	100
Fig. 3.4-19. Experimentul C9. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\ \text{W/m}^2$ , scurtcircuitare $R_L \in \{10, 35\}\ \Omega$ , $T_R = 0.5$ secunde.....	101
Fig. 3.4-20. Experimentul C10. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\ \text{W/m}^2$ , incrementare $R_L \in [10, 20]\ \Omega$ , $T_R = 0.03125$ secunde.....	101
Fig. 3.4-21. Experimentul C11. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\ \text{W/m}^2$ , decrementare $R_L \in [20, 10]\ \Omega$ , $T_R = 0.03125$ secunde.....	102
Fig. 3.4-22. Experimentul C12. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\ \text{W/m}^2$ , scurtcircuitare $R_L \in \{10, 35\}\ \Omega$ , $T_R = 0.03125$ secunde.....	103
Fig. 3.4-23 Schema implementată pe modulul dSpace pentru cazul „emulator cu bloc compensator”.....	103
Fig. 4.2-1. Dependența $F_2(I)$ .....	109
Fig. 4.2-2. Modelul Simulink - „Determinare MPP”.....	109
Fig. 4.2-3 (1)-caracteristica $I(V)$ și (2)-caracteristica $P(V)$ ale PV_P LD 664431.....	110
Fig. 4.2-4. Determinare MPP - Scenariul 1: variațiile curentului $I$ , tensiunii $V$ și puterii $P$	110
Fig. 4.2-5. Determinare MPP - Scenariul 2: variațiile curentului $I$ , tensiunii $V$ și puterii $P$	111
Fig. 4.2-6. Structură de conducere MPPT cu memorarea coordonatelor MPP.....	113
Fig. 4.2-7. Metoda Perturbă și Observă.....	114
Fig. 4.3-1. Structură de principiu pentru determinarea și menținere funcționării sistemului cu panou fotovoltaic în vecinătatea MPP.....	115
Fig. 4.3-2. Caracteristici $I(V)$ pentru diferite valori ale temperaturii - a) și ale intensității radiației solare - b).....	116
Fig. 4.3-3. Rezultatele obținute folosind Simulink - Lookup Table pentru $I_{MPP} = f_1(\theta, G)$ și $V_{MPP} = f_2(\theta, G)$ .....	120
Fig. 4.3-4. Rezultatele obținute folosind Simulink - Lookup Table pentru $P_{MPP} = f_3(\theta, G)$	120

Fig. 4.3.5. Structură de principiu pentru determinarea și menținere MPP pe baza măsurării mărimilor $\theta_{air}$ , $G_{h-dif}$ , $G_{h-dir}$ , și $\bar{p}$ .....	120
Fig. 4.3-6. Obținerea caracteristicii (5) prin interpolare folosind caracteristicile (1) și (2).....	121
Fig. 4.3-7. Obținerea caracteristicii (6) prin interpolare folosind caracteristicile (3) și (4).....	121
Fig. 4.3-8. Obținerea caracteristicii (7) prin interpolare folosind caracteristicile (5) și (6).....	122
Fig. 4.4-1 Schemă electrică de principiu cu convertor Buck alimentat de la o sursă de tensiune.....	124
Fig. 4.4-2. Schemă de principiu a alimentării convertorului Buck de la un generator de curent.....	125
Fig. 4.4-3. Schemă electrică de convertor Buck cu element de netezire.....	125
Fig. 4.4-4. Schemă de alimentare de la un panou fotovoltaic a unui consumator, prin intermediul unui convertor Buck.....	125
Fig. 4.4-5. Schemă Simulink de testare a MM-ISI al sistemului PV_P - Convertor Buck - Consumator prezentat în Fig. 4.4-4 (schema Testare 1).....	127
Fig. 4.4-6 Modelul Simulink corespunzător MM-ISI convertor Buck.....	128
Fig. 4.4-7. a) Semnalul de comandă $\tilde{u}(t)$ pentru scenariile de simulare 1 - 4. b) zoom al semnalului $\tilde{u}(t)$ .....	129
Fig. 4.4-8. Rezultate obținute cu Schema Testare 1 - Scenariul 1: semnalele $V_{PV\_P}(t)$ , $V_{OUT}(t)$ , $V_{C1}(t)$ și $I_d(t)$ .....	130
Fig. 4.4-9. Caracteristica $I(V)$ utilizate în scenariile 2 și 4, $\theta = 25$ °C.....	130
Fig. 4.4-10. Rezultate obținute cu Schema Testare 1 - Scenariul 2: a) semnalele $V_{PV\_P}(t)$ , $V_{OUT}(t)$ , $V_{C1}(t)$ și $I_d(t)$ pentru panou în cazul $G = 1000$ W/m <sup>2</sup> ; b) zoom al semnalelor monitorizate pentru $u = 0.4$ .....	131
Fig. 4.4-11. Caracteristici de comandă pentru schema din Fig. 4.4-4: a) $V_{PV\_P\_med}(u)$ - albastru, $V_{OUT\_med}(u)$ - roșu; b) $I_{PV\_P\_med}(u)$ - albastru, $I_{OUT\_med}(u)$ - roșu; c) $P_{PV\_P\_med}(u)$ - albastru, $P_{OUT\_med}(u)$ - roșu; d) $V_{C1\_med}(u)$ .....	133
Fig. 4.4-12. Caracteristici de comandă $P_{PV\_P\_med}(u)$ pentru $\theta=25$ °C, respectiv $G=400$ W/m <sup>2</sup> - albastru, $G=600$ W/m <sup>2</sup> - roșu, $G=800$ W/m <sup>2</sup> - verde, $G=1000$ W/m <sup>2</sup> - mov.....	133
Fig. 4.4-13. Schemă electrică de principiu a convertorului Boost alimentat de la o sursă tensiune.....	134
Fig. 4.4-14. Schemă electrică de principiu a convertorului Boost alimentat de la o sursă curent.....	134
Fig. 4.4-15. Schemă electrică a unui convertor Boost cu element de netezire.....	135
Fig. 4.4-16. Conexiune panou - convertor Boost - consumator.....	135
Fig. 4.4-17. Schemă Simulink de Testare a MM-ISI al sistemului PV_P - Convertor Boost - Consumator prezentat în Fig. 4.4-16. (schema Testare 2)...	136
Fig. 4.4-18. Modelul Simulink corespunzător MM-ISI convertor Boost.....	137
Fig. 4.4-19. Rezultate obținute în urma testului MM-ISI convertor Boost, Scenariul 3.....	138
Fig. 4.4-20. Rezultate obținute în urma testului MM-ISI convertor Boost, Scenariul 4: a) semnalele $V_{PV\_P}(t)$ , $V_{OUT}(t)$ , $V_{C1}(t)$ și $I_d(t)$ pentru panou în cazul $G = 1000$ W/m <sup>2</sup> ; b) zoom al semnalelor monitorizate pentru $u = 0.6$ .....	139



Fig. 4.4-21. Caracteristici de comandă pentru schema din Fig. 4.4-16:	
a) $V_{PV\_P\_med}(u)$ - albastru, $V_{OUT\_med}(u)$ - roșu;	
b) $I_{PV\_P\_med}(u)$ - albastru, $I_{OUT\_med}(u)$ - roșu;	
c) $P_{PV\_P\_med}(u)$ - albastru, $P_{OUT\_med}(u)$ - roșu;	
d) $V_{C_1\_med}(u)$ .....	140
Fig. 4.4-22. Caracteristici de comandă $P_{PV\_P\_med}(u)$ pentru $\theta=25\text{ }^\circ\text{C}$ ,	
respectiv $G=400\text{ W/m}^2$ - albastru, $G=600\text{ W/m}^2$ - roșu,	141
$G=800\text{ W/m}^2$ - verde, $G=1000\text{ W/m}^2$ - mov.....	
Fig. 4.4-23. Sistem de reglare a tensiunii de la bornele unui panou fotovoltaic	
folosind ca mărime de referință tensiunea corespunzătoare MPP	141
obținută de la un bloc interpolator.....	
Fig. 4.4-24. Comportarea sistemului de reglare din Fig. 4.4-23 în cazul unui	
convertor Boost.....	144
Fig. 4.4-25. Comportarea sistemului de reglare din Fig. 4.4-23 în cazul unui	
convertor Buck.....	144
Fig. A3.1-1. Setare tabel de interpolare.....	162
Fig. A3.2-1. Înregistrări ale semnalelor $U$ , $V_S^*$ , $V_S$ în cazul discretizării	
semnalului cu pasul de 5 secunde ( $h_{dS} = 5$ secunde).....	165
Fig. A3.2-2. Înregistrări ale semnalelor $U$ , $V_S^*$ , $V_S$ în cazul discretizării	
semnalului cu pasul de 5 secunde ( $h_{dS} = 5$ secunde).....	165
Fig. A3.2-3. Înregistrări ale semnalelor $U$ , $V_S^*$ , $V_S$ în cazul discretizării	
semnalului cu pasul de 5 secunde ( $h_{dS} = 5$ secunde).....	166
Fig. A3.2-4. Înregistrări ale semnalelor $U$ , $V_S^*$ , $V_S$ în cazul discretizării	
semnalului cu pasul de 5 secunde ( $h_{dS} = 5$ secunde).....	166
Fig. A3.2-5. Înregistrări ale semnalelor $U$ , $V_S^*$ , $V_S$ în cazul discretizării	
semnalului cu pasul de 5 secunde ( $h_{dS} = 5$ secunde).....	167
Fig. A3.3-1. Experimentul C13. $\theta = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , $G = 600\text{ W/m}^2$ , incrementare	
$R_L \in [10, 20]\ \Omega$ , $T_R = 0.25$ secunde.....	168
Fig. A3.3-2. Experimentul C14. $\theta = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , $G = 600\text{ W/m}^2$ , decrementare	
$R_L \in [20, 10]\ \Omega$ , $T_R = 0.25$ secunde.....	168
Fig. A3.3-3. Experimentul C15. $\theta = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , $G = 600\text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare	
$R_L \in \{10, 35\}\ \Omega$ , $T_R = 0.25$ secunde.....	168
Fig. A3.3-4. Experimentul C16. $\theta = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , $G = 600\text{ W/m}^2$ , incrementare	
$R_L \in [10, 20]\ \Omega$ , $T_R = 0.125$ secunde.....	169
Fig. A3.3-5. Experimentul C17. $\theta = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , $G = 600\text{ W/m}^2$ , decrementare	
$R_L \in [20, 10]\ \Omega$ , $T_R = 0.125$ secunde.....	169
Fig. A3.3-6. Experimentul C18. $\theta = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , $G = 600\text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare	
$R_L \in \{10, 35\}\ \Omega$ , $T_R = 0.125$ secunde.....	169
Fig. A3.3-7. Experimentul C19. $\theta = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , $G = 600\text{ W/m}^2$ , incrementare	
$R_L \in [10, 20]\ \Omega$ , $T_R = 0.0625$ secunde.....	170

Fig. A3.3-8. Experimentul C20. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\text{ W/m}^2$ , decrementare $R_L \in [20, 10]\ \Omega$ , $T_R = 0.0625$ secunde.....	170
Fig. A3.3-9. Experimentul C21. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare $R_L \in \{10, 35\}\ \Omega$ , $T_R = 0.0625$ secunde.....	170
Fig. A3.4-1. Experimentul C22. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\text{ W/m}^2$ , incrementare $R_L \in [10, 20]\ \Omega$ , $T_R = 0.0625$ secunde.....	171
Fig. A3.4-2. Experimentul C23. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare $R_L \in \{10, 35\}\ \Omega$ , $T_R = 0.0625$ secunde.....	171
Fig. A3.5-1. Experimentul D1. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare $R_L \in \{10, 35\}\ \Omega$ , $T_R = 0.5$ secunde, $T_D = 0.3$ secunde, $T_1 = 0.01$ secunde....	172
Fig. A3.5-2. Experimentul D2. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare $R_L \in \{10, 35\}\ \Omega$ , $T_R = 0.5$ secunde, $T_D = 0.4$ secunde, $T_1 = 0.01$ secunde....	172
Fig. A3.5-3. Experimentul D3. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare $R_L \in \{10, 35\}\ \Omega$ , $T_R = 0.5$ secunde, $T_D = 0.5$ secunde, $T_1 = 0.01$ secunde....	173
Fig. A3.5-4. Experimentul D4. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare $R_L \in \{10, 35\}\ \Omega$ , $T_R = 0.5$ secunde, $T_D = 0.6$ secunde, $T_1 = 0.01$ secunde....	173
Fig. A3.5-5. Experimentul D5. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare $R_L \in \{10, 35\}\ \Omega$ , $T_R = 0.5$ secunde, $T_D = 0.4$ secunde, $T_1 = 0.04$ secunde....	173
Fig. A3.5-6. Experimentul D6. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare $R_L \in \{10, 35\}\ \Omega$ , $T_R = 0.5$ secunde, $T_D = 0.5$ secunde, $T_1 = 0.001$ secunde..	174
Fig. A3.5-7. Experimentul D6. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare $R_L \in \{10, 35\}\ \Omega$ , $T_R = 0.03125$ secunde, $T_D = 0.5$ secunde, $T_1 = 0.01$ secunde.....	174
Fig. A3.5-8. Experimentul D8. $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $G = 600\text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare $R_L \in \{10, 35\}\ \Omega$ , $T_R = 0.5$ secunde, $T_D = 0.5$ secunde, $T_1 = 0.04$ secunde....	174
Fig. A4.2-1. Modelul Simulink utilizat în etapa 1 – interpolarea între caracteristicile (1) cu (2) și conduce la caracteristică (5).....	180
Fig. A4.2-2. Modelul Simulink utilizat în etapa 2 – interpolarea între caracteristicile (3) cu (4) și conduce la caracteristică (6).....	180
Fig. A4.2-3. Modelul Simulink utilizat în etapa 3 – interpolarea între caracteristicile (5) cu (6) și conduce la caracteristică (7).....	181

# 1. INTRODUCERE

## 1.1. Celula fotovoltaică

Celula fotovoltaică (Fig. 1.1-1 conform [wiki 2011]), este un dispozitiv electric care convertește direct radiația solară în energie electrică folosind efectul fotovoltaic [Popov 2010], [wiki 2011].



Fig. 1.1-1. Celula fotovoltaică [wiki 2011]

Celulele fotovoltaice sunt realizate din materiale semiconductoare. Conform [\*\*\* 2005] cele mai utilizate celule fotovoltaice sunt cele monocristaline din Siliciu. Pe parcursul acestei teze de doctorat se folosesc și se fac referiri numai cu privire la celulele fotovoltaice monocristaline din Siliciu și la structuri rezultate din acestea.

Dacă considerăm celula fotovoltaică conectată la o rezistență de sarcină  $R_L$  conform schemei electrice din Fig. 1.1-2, comportarea ei în raport cu rezistența de sarcină este cea a unui generator de curent cu caracteristică neliniară descrisă de dependența  $I(V)$  numită caracteristică externă a celulei. Aspectul general al caracteristicii, pentru o intensitate constantă a radiației solare, este cel din Fig. 1.1-3, asemănându-se, ca formă, cu caracteristica unei diode de Siliciu. Caracteristica externă  $I(V)$  variază în funcție de intensitatea radiației solare între două poziții extreme: (1) și (2). Caracteristica (1) corespunde lipsei radiației solare, iar caracteristica (2) valorii maxime a intensității radiației solare. Modelarea celulei este prezentată în capitolul 2.

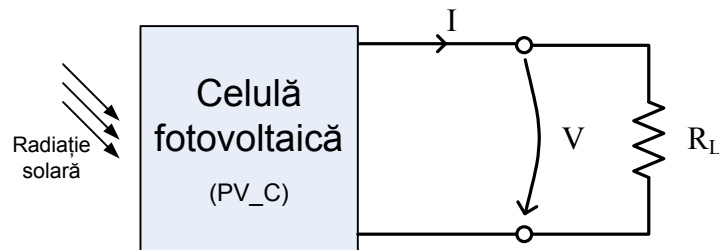
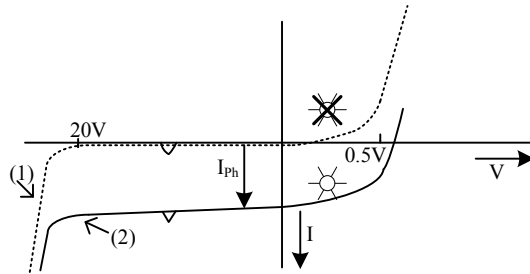
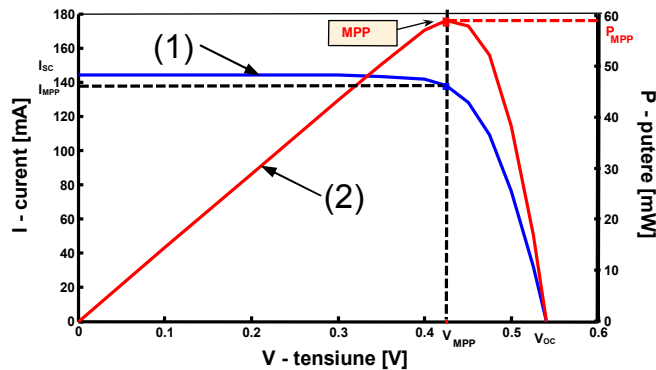


Fig. 1.1-2. Circuit celulă fotovoltaică – rezistență de sarcină  $R_L$

Fig. 1.1-3. Caracteristica  $I(V)$  pentru o celulă fotovoltaică

În Fig. 1.1-4, cu (1) este redată porțiunea funcțională a caracteristicii  $I(V)$ , corespunzătoare funcționării celulei în regim de sursă de energie electrică. Ea corespunde valorilor  $V \geq 0, I \geq 0$  ale curbei (2) din Fig. 1.1-3, denumită zonă de "tensiune directă" sau *solar cell characteristic curve*. Porțiunea funcțională este delimitată de punctul de scurtcircuit,  $V = 0, I = I_{SC}$ , și de punctul de mers în gol (sau de circuit deschis),  $V = V_{OC}, I = 0$ , care pot fi determinate experimental [Duran 2008]. Curba (2) din Fig. 1.1-4, reprezintă caracteristica putere-tensiune,  $P(V)$ , asociată caracteristicii externe (1) a celulei fotovoltaice.  $P = I \cdot V$  este puterea debitată de celulă. Ca și în Fig. 1.1-3, ambele caracteristici,  $I(V)$  și  $P(V)$ , corespund supunerii celulei fotovoltaice unei intensități a radiației solare constante. *MPP* reprezintă punctul de putere maximă.

Fig. 1.1-4. (1)- caracteristica  $I(V)$ , (2)- caracteristica  $P(V)$  ale celulei fotovoltaice

Principalii parametri ai celulelor furnizați de producători [datasheet pv1], [datasheet pv2] sunt:

- curentul de scurt circuit -  $I_{SC}$ ,
- tensiunea de mers în gol (tensiunea în circuit deschis) -  $V_{OC}$ ,
- puterea maximă -  $P_{MPP}$ ,
- curentul corespunzător punctului de putere maximă -  $I_{MPP}$ ,
- tensiunea corespunzătoare punctului de putere maximă -  $V_{MPP}$ .

Toți parametrii sunt estimați pentru condiții de testare standard (*STC* - Standard Test Condition) conform standardului IEC 60904/DIN EN 60904. *STC* pentru celula fotovoltaică sunt [\*\*\* 2005], [datasheet pv1], [datasheet pv2]:

- intensitatea luminoasă -  $1000 \text{ W/m}^2$ ,
- temperatura celulei solare -  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- distribuția spectrală a luminii corespunzătoare indicelui de masă a aerului AM 1,5.

Lista parametrilor menționați are un caracter general, în sensul că se folosește pentru toate tipurile de dispozitive fotovoltaice (celule, module, panouri).

## 1.2. Conectarea celulelor fotovoltaice în panouri fotovoltaice

Așa cum se poate observa și din Fig. 1.1-4, valorile tensiunii  $V_{OC}$  și curentului  $I_{SC}$  pentru o celulă sunt reduse (în figură ele sunt sub  $0.7 \text{ V}$ , respectiv sub  $160 \text{ mA}$ ). Valoarea  $I_{SC}$  se poate crește mărind suprafața celulei. Pentru a obține tensiuni și curenți mai mari, celule se conectează în diferite configurații electrice denumite module sau panouri fotovoltaice (*PV\_P- Photovoltaic Panel*).<sup>1</sup>

Astfel, pentru obținerea unei tensiuni  $V_{OC}$  mai mari se conectează mai multe celule în serie, conform Fig. 1.2-1, iar pentru obținerea unui curent  $I_{SC}$  mai mare se conectează mai multe celule în paralel, conform Fig. 1.2-2.

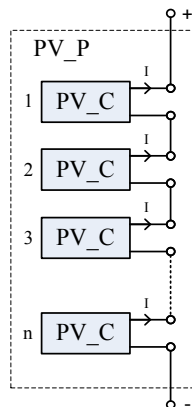


Fig. 1.2-1. Structura unui panou cu celule conectate în serie

<sup>1</sup> În general termenii „modul” și „panou” se consideră sinonimi. Totuși, în literatură, există lucrări în care termenul „modul” este folosit pentru configurații cu un număr mai redus de celule, iar cel de panou pentru configurații cu un număr mai mare de celule sau pentru structuri rezultate prin interconectarea mai multor module și prevederea de elemente de protecție. În cadrul tezei se folosește, în principal, termenul „panou”.

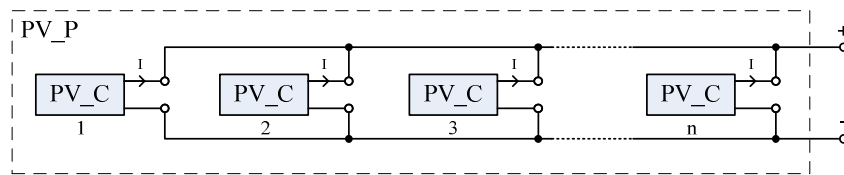
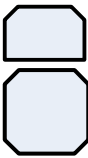


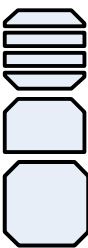
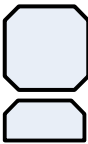
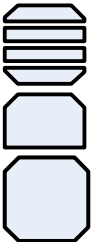


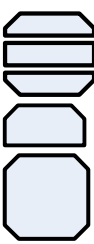




Fig. 1.2-2. Structura unui panou cu celule conectate în paralel

În tabelul 1.2-1 sunt prezentate date cu privire la principalele produse existente pe piață.

**Tabelul 1.2-1:** Tipuri de panouri fotovoltaice oferite pe piață

Nr. crt.	Producător	Formă celulă	Dimensiune celulă (mm)	Mod conectare	Domeniu de putere (W)	Diodă By-Pass	Accesare
1	Perlight Solar		125×83.3 125×125 156×156	54S÷72S	5÷270	Da	[PV1]
2	Thousand Suns		125×125	30S÷36S	20÷100	Da	[PV2]
3	Astro Power		-	36S	50÷120	Da	[PV3]
4	BOL Photovoltaic		125×17.86 125×72 125×125 156×156	36S÷72S	8÷300	-	[PV4]
5	BEIJING HOPE SOLAR POWER CO		-	36S÷72S	8÷180	-	[PV5]

6	Bluetechsolar		125×30 125×70 125×80 125×125	36S÷72S	3÷180	-	[PV6]
7	Bright solar		-	36S÷96S	35÷240	-	[PV7]
8	Bhel Edn Bangalore	-	-	36S÷NC	10÷240	-	[PV8]
9	BP solar		125×125	72S	170÷180	Da 3	[PV9]
10	FGVenergy		125×42 125×62.5 125×125	36S÷96S	25÷250	Nu/Da	[PV10]
11	Deutsche Cell		156×156	40S÷60S	150÷245	-	[PV11]
12	Ningbo Loyal Lighting & Meter Co		125×125 156×156	60S÷96S	155÷295	-	[PV12]

După cum se poate observa din tabel, pentru produsele existente pe piață, în majoritatea cazurilor celulele sunt conectate în serie. Pentru protecția panoului în cazul unei iluminări neuniforme, la majoritatea panourilor, în paralel cu o parte din celulele înseriate se poate lega o diodă de By-Pass (diodă de mers în gol). Astfel, dacă un grup de celule este umbrat, dioda preia diferența de curent de pe respectivul grup de celule protejând panoul. Structura unui panou fotovoltaic cu diodă de By-Pass este prezentată în Fig. 1.2-3.

Din motive de utilizare cât mai bună a spațiului, majoritatea celulelor au formă pătrată [\*\*\* 2005]. Mai există și celule rotunde și semirotunde [\*\*\* 2005].

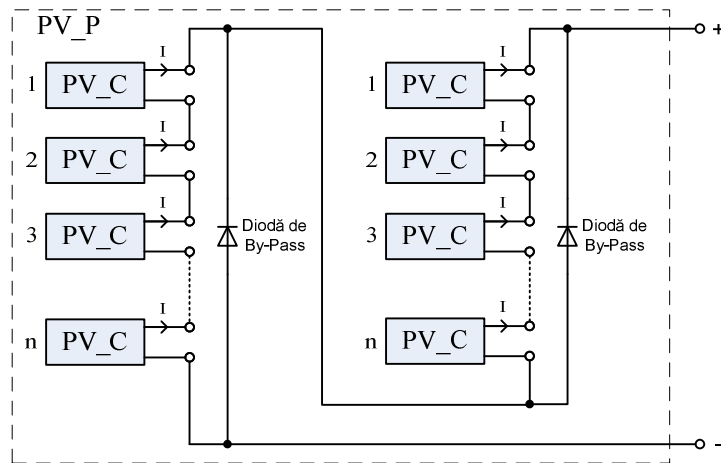


Fig. 1.2-3. Structura unui panou cu diode de By-Pass

Caracteristicile  $I(V)$  și  $P(V)$  ale panourilor fotovoltaice se aseamănă ca aspect foarte mult cu cele ale celulelor iar valoarea  $P_{MPP}$  crește odată cu mărirea numărului de celule și/sau mărirea suprafeței celulei. În literatură există o serie de abordări care încearcă să determine parametrii echivalenți ai panourilor fotovoltaice pe baza regulilor de conectare în serie și în paralel a rezistențelor și generatoarelor ideale de curent. Cu titlu de exemplificare pot fi menționate lucrările [\*\*\*, 2008], [Gules 2008] și [Wang 2011]. Nici una dintre aceste abordări nu este însă riguroasă.

Plecând de la observarea asemănării caracteristicilor celulelor cu ale panourilor, pe tot parcursul tezei se folosesc pentru panouri același tip de modele matematice ca și pentru celule, păstrându-se aceiași parametri ca ai celulelor, însă cu interpretarea de „parametrii echivalenți ai panoului”. Ei pot fi determinați prin diferite metode de identificare. Pentru determinarea experimentală a caracteristicilor externe  $I(V)$  folosite în capitolele ce urmează s-a folosit un montajul volt-ampmetric elementar.

### 1.3. Sisteme cu panouri fotovoltaice

În aplicații practice panourile fotovoltaice se utilizează împreună cu alte echipamente pentru a realiza sisteme generatoare de energie electrică. Structurile rezultate le denumim sisteme cu panouri fotovoltaice. Conform [\*\*\* 2008], principalele variante sunt cele din Fig. 1.3-1.

Sistemele conectate la rețea sunt folosite ca o sursă de energie alternativă sau complementară celei reprezentate de rețeaua publică de energie electrică. Conectarea la rețeaua publică se poate face direct sau prin intermediul rețelei electrice a unei locuințe. Sistemele conectate la rețea nu fac obiectul acestei teze de doctorat.

Sistemele autonome au dezavantajul necesității de a stoca energia produsă de panouri în unul sau mai multe acumulatori electrice. Excepție fac sistemele care pot acumula energia în alt mod, de exemplu sistemele de pompare a apei care pot acumula energia într-un turn de apă.



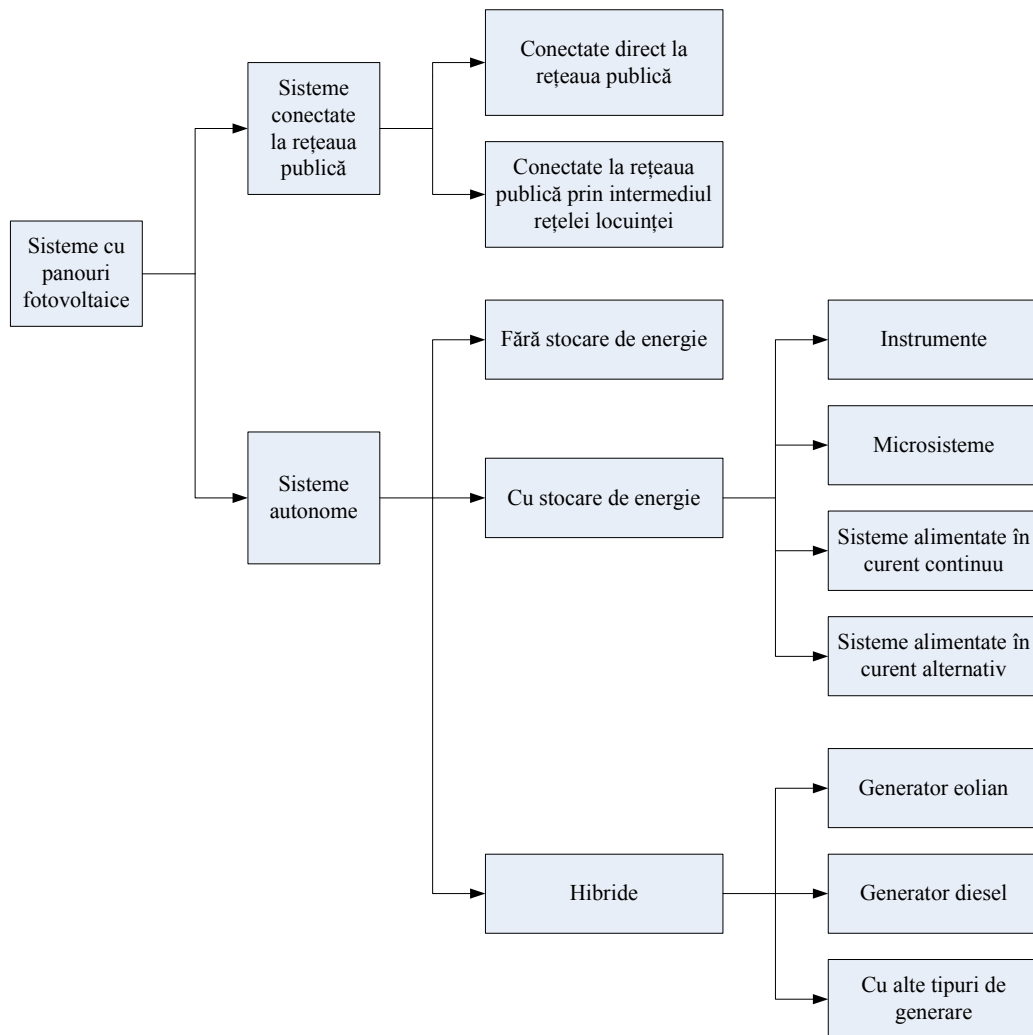


Fig. 1.3-1. Variante de sisteme cu panouri fotovoltaice

În continuare referirile se fac doar cu privire la sistemele autonome cu panouri fotovoltaice. Astfel, în Fig. 1.3-2 sunt sintetizate, de o manieră simplificată, structurile „clasice” de sisteme autonome (diferitele variante se obțin „închizând” în mod adecvat comutatoarele).

De cele mai multe ori, sistemele autonome sunt utilizate atunci când un consumator nu se poate conecta sau este dificil de conectat la rețeaua electrică locală. Astfel există sisteme/micro sisteme pentru:

- încărcare de acumuloare la telefoanele mobile sau laptop-uri;
- semafoare/semnalizări din exteriorul localităților;
- pompe pentru sisteme de alimentare cu apă, sisteme de irigații sau sisteme de tratare a apei;
- clădiri izolate;

- telefoane de urgență;
- automate de parcare;
- comunicare radio;
- aplicații de grădinărit.

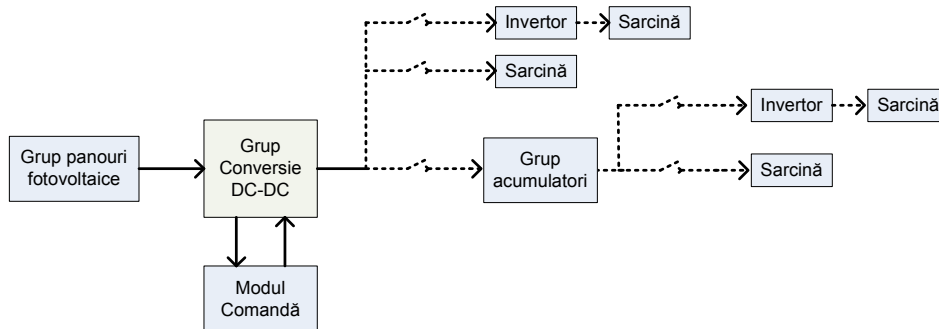


Fig. 1.3-2. Sistem fotovoltaic autonom (structură generică)

#### 1.4. Obiectivul tezei și conținutul acesteia în contextul cercetărilor referitoare la dispozitivele fotovoltaice și utilizarea acestora

Imposibilitatea de a descrie cantitativ în mod exact procesele din interiorul unei celule fotovoltaice și limitarea utilizatorilor la operarea cu modele cu parametri concentrați fac ca toate modelele matematice ale dispozitivelor fotovoltaice să fie, eminent, modele de aproximare. La ora actuală nu există un model standard pentru dispozitivele fotovoltaice. În cercetările aplicative se folosesc, sub denumirea de caracteristici ale dispozitivelor fotovoltaice, mai multe tipuri de dependențe neliniare care redau cu aproximație și de o manieră neinerțială legătura dintre curentul, tensiunea și puterea de la bornele dispozitivului pentru diferite valori ale unor factori de mediu externi, în principal intensitatea radiației solare și temperatura de lucru, considerați ca parametri. Întrucât aceste dependențe nu surprind și inerția proceselor din celule, din punct de vedere dinamic avem de a face cu sisteme neinerțiale.

În mod riguros un model al unui dispozitiv fotovoltaic trebuie privit altfel, și anume, ca având orientarea intrare-ieșire tocmai *de la* factori de mediu externi care declanșează procesele de conversie fotovoltaică *la* caracteristici. Această abordare este reluată în capitolul 2, paragraful 2.2.1 prin schemele bloc din Fig. 2.2-3, în experimentele pe emulator prezentate în capitolul 3 și prin ansamblul prezentat în capitolului 4. Un argument suplimentar pentru modelarea dispozitivelor fotovoltaice este dificultatea realizării operative a unor experimente relevante în mediu natural din punctul de vedere al unor scenarii de variație a factorilor de mediu.

Punctul de funcționare al unui dispozitiv fotovoltaic depinde de caracteristica dispozitivului și de caracteristica circuitului extern. Datorită modificării caracteristicii odată cu modificarea intensității factorilor externi, principal, caracteristica dispozitivului se poate modifica în permanență.

Cu cât modelele surprind mai îndeaproape procesele din celulă ele sunt mai complexe și numărul parametrilor folosiți în model este mai mare. Aceasta face ca și problema identificării parametrilor să fie mai dificil de soluționat. În acest context, o serie de lucrări de dată recentă folosesc diferite tipuri de modele și propun metode de identificare a parametrilor. Tot de dată recentă este și utilizarea de modelelor de tip interpolativ. Un astfel de model se bazează pe memorarea unui număr redus de caracteristici experimentale ale dispozitivului fotovoltaic și folosirea unui algoritm de interpolare pentru generarea punctelor de funcționare pentru niveluri date ale semnalelor corespunzătoare factorilor externi.

Prezenta teză de doctorat își propune ca în perimetrul jalonat prin aspectele de mai sus, precum și de cele prezentate în paragrafele 1.1, 1.2 și 1.3, să atingă trei obiective legate de modelele dispozitivelor fotovoltaice și utilizarea lor:

- 1) sistematizarea, clarificarea și completarea cunoștințelor și tehnicilor folosite pentru modelarea dispozitivelor fotovoltaice,
- 2) realizarea unui emulator de panouri fotovoltaice și
- 3) utilizarea de modele asociate dispozitivelor fotovoltaice pentru conducerea de sisteme cu panouri fotovoltaice.

Aceste obiective fac obiectul capitolelor 2, 3, respectiv 4. Prezentarea rezultatelor din capitolele 2 și 4 au făcut obiectul mai multor lucrări publicate de autor. Capitolul 3 va furniza baza unor viitoare comunicări. Capitolul 5 sintetizează rezultatele obținute și contribuțiile autorului.

În continuare se sintetizează documentarea realizată cu privire la cele trei obiective și amplasează contribuțiile tezei în referențialul astfel creat.

În contextul descris problema modelării este și în prezent de actualitate. Pe parcursul capitolului 2 sunt prezentate tipuri de modele și metode de modelare ale dispozitivelor fotovoltaice.

În literatură se utilizează cel mai des, datorită compromisului simplitate-aproximare, modelul de tip schemă electrică cu o diodă extinsă [Chegaar 2004a], [Chegaar 2004b], [Park 2004], [\*\*\* 2005], [Francisco 2005], [Soto 2006], [Bouzidi 2007], [Campbell 2007], [Lal 2007], [Petreuş 2008], [Tafticht 2008], [\*\*\* 2008], [Chu 2009], [Liquan 2009], [Moldovan 2009], [Petreuş 2009], [Piazza 2009], [Alam 2010], [Khan 2010], [Nehaoua 2010], [Lee 2011], [Mitroi 2011], [Chouder 2012]. De asemenea, în practică sunt folosite frecvent modele empirice [Petreuş 2008], iar aspectul investigat în teză în această privință a fost compararea lor cu modelele bazate pe scheme electrice.

Atunci când primează aspectul simplității este preferat modelul cu o diodă simplificat [Lopes 2003], [Sera 2006], [Sera 2008a], [Valentini 2008], [\*\*\*, 2008], [Koutroulis 2009].

Aproximări foarte bune ale caracteristicilor dispozitivelor fotovoltaice, în special în zona radiației solare scăzute precum și la capetele caracteristicilor  $I(V)$ , se obțin cu modelul cu două diode [Petreuş 2008], [Singh 2008], [Tafticht 2008], [Ishaque 2011a], [Ishaque 2011b], [Ishaque 2011c], [Ishaque 2011d]. Principalul dezavantaj al acestui model îl constituie dificultatea obținerii parametrilor din ecuațiile transcendente la care se ajunge în operarea cu acest model. Datorită performanțelor modelului cu 2 diode precum și al interesului tot mai mare manifestat de diferite studii în folosirea lui, în teză s-a utilizat de cele mai multe ori acest model pentru care se propune o metodă de identificare și metode de rezolvare a ecuațiilor transcendente care creează premise de folosire mai ușoară a modelului.

O serie de cercetări din ultimii ani au condus la metode de obținere, relativ simplă și cu o precizie bună, a caracteristicilor dispozitivelor fotovoltaice prin interpolare plecând de la un număr redus de caracteristici experimentale cunoscute. [Marion 2004], [Tsuno 2009], [Dolan 2010]. În teză, ansamblul caracteristici memorate-algoritmi de interpolare este considerat ca model de tip interpolativ. Ansamblul poate fi integrat ușor în programe de calcul utilizabile off-line sau on-line. Evident, un model de tip interpolativ are dezavantajul lipsei unei expresii analitice explicite.

Realizarea unor emulatoare de panouri fotovoltaice, destinate substituiri panourilor în experimente de laborator, reprezintă o problemă abordată în literatura de specialitate cu mai puțin de 10 ani în urmă. Pentru a realiza o emulare de panouri fotovoltaice este necesară adoptarea a două ipoteze de lucru: adoptarea modelului caracteristicii externe  $I(V)$  a panoului fotovoltaic și stabilirea suportului de implementare a modelului adoptat.

În lucrările publicate până în 2009 modelul adoptat a fost, predominant, modelul cu o diodă simplificat [Sera 2006], [Sera 2008b], [Valentini 2008], [2009 Koutroulis]. Ulterior, cercetările s-au orientat spre adoptarea modelului de precizie mai bună, anume spre modelul cu o diodă extins [Dolan 2010], [Lee 2011] sau spre o variație simplificată a acestuia în care se renunță la utilizarea rezistenței  $R_p$  [Cirrincione 2008], [Piazza 2010].

În ceea ce privește implementarea sunt de reținut trei tipuri de soluții (a căror manieră de prezentare nu permite reproducerea): cele bazate pe utilizarea unei surse de tensiune neprogramabile împreună cu un convertor DC-DC ([Cirrincione 2008], [Piazza 2010], [Dolan 2010], [Koutroulis 2009]), cele ce folosesc divizarea tensiunii provenite de la o sursă de tensiune neprogramabilă cu ajutorul unui dispozitiv programabil ([Lee 2011], [Lopes 2003]) și cele care folosesc o sursă de tensiune programabilă (grupul de cercetare de la Universitatea din Aalborg în [Sera 2006], [Sera 2008b], [Valentini 2008]).

În cadrul capitolului 3 este prezentată o variantă de emulator al unui panou fotovoltaic realizată cu ajutorul unei surse de tensiune programabile și a unei plăci dSPACE, destinată implementării modelului cu 2 diode. Pe lângă utilizarea acestui model, studiul întreprins analizează și stabilitatea emulatorului, aspect omis în toate studiile mai sus menționate.

În capitolul 4 este tratată determinarea pe bază de modele a punctului de putere maximă (MPP) pentru panourile fotovoltaice. Această determinare este necesară pentru creșterea randamentului de utilizare a panoului fotovoltaic. Conform [Knopf 1999], fără urmărirea MPP, panoul furnizează doar 31,3% din puterea disponibilă. Caracteristica  $I(V)$  este influențată de modificările factorilor de mediu precum: temperatura panoului, intensitatea radiației solare, orientarea panoului și timpul curent (poziția Soarelui) [Soga 1999], [Katz 2001], [Landau 2002], [Marion 2002], [Kacira 2004], [Li 2007], [Yang 2007b], [\*\*\*, 2008], [Nooriana 2008], [Philipps 2008], [Singh 2008], [Skoplaki 2009], [Pettersson 2009], [Ito 2011], [Lorenz 2011] și [Marcos 2011]. Din acest motiv și MPP se modifică la variația factorilor de mediu crescând dificultatea determinării respectiv a urmării MPP.

Paragraful 4.2 prezintă determinarea MPP cu scopul sintetizării de generatoare de mărimi de referință pentru conducerea sistemelor cu panouri fotovoltaice. În primul rând este luată în considerare utilizarea modelelor matematice

din cadrul capitolului 2, iar în al doilea rând posibilitatea de folosire a structurilor de conducere actuale bazate pe strategii specifice sistemelor extremale.

Considerând modelul de tip schemă electrică cu două diode cel mai performant model de tip schemă electrică [\*\*\*, 2008], am dezvoltat o metodă de determinare a MPP pentru acest model. Metoda depășește dificultatea soluționării ecuației transcendente generate de acest model. Metoda a fost prezentată de autor în lucrarea [Dragomir 2010b].

Pentru a realiza un generator de coordonate ale MPP în situații practice în care se dispune doar de un număr redus de caracteristici experimentale, în paragraful 4.3 se prezintă sintetizarea unor modele interpolative utilizabile pentru determinarea coordonatelor MPP. Ele se bazează pe ipoteza măsurării temperaturii panoului respectiv a intensității radiației solare. În această privință se face distincție între „cazul ideal”, în care se presupune că temperatura și intensitatea radiației solare la nivelul panoului ( $\theta$  și  $G$ ) sunt direct măsurabile, și cazul real „caz real”, când cele două mărimi sunt estimate pe baza măsurării temperaturii aerului, intensității radiației directe, intensității radiației difuze, orientării panoului și a poziției curente a Soarelui. Soluția propusă de generare a coordonatelor MPP este validată folosind caracteristicile determinate prin metoda Tsuno [Tsuno 2009].

Paragraful 4.4 tratează studiul comportării unor sisteme de conducere cu mărimi de referință generate prin interpolare. Prezentarea detaliază modelarea convertoarelor folosite și rezultatele obținute cu o structură de reglare convențională a tensiunii de la bornele panoului în contextul unui miniscenariu de variație diurnă a intensității radiației solare.

## 2. MODELE PENTRU DISPOZITIVE FOTOVOLTAICE

În analiza diferitelor sisteme cu dispozitive fotovoltaice se operează cu modele matematice. Obiectul capitolului îl reprezintă aprofundarea mai multor aspecte referitoare la principalele modele folosite. În paragraful 2.1 se prezintă problematica modelării dispozitivelor fotovoltaice și în acest context, trei tipuri de modele folosite în teză împreună cu raportarea lor la literatura de specialitate. Cele trei tipuri de modele sunt discutate explicit în următoarele trei paragrafe. În paragraful 2.5 se tratează o metodă de rezolvare a ecuațiilor care rezultă din folosirea unuia dintre modelele matematice complexe. Rezolvarea se face prin apelarea unui model Simulink. Paragraful 2.6. este destinat identificării parametrilor modelelor matematice ale dispozitivelor fotovoltaice, iar în ultimul paragraf se compară caracteristicile  $I(V)$  și  $P(V)$  obținute cu diferite modele plecând de la caracteristici experimentale comune.

Cea mai mare parte din rezultatele prezentate în acest capitol au fost publicate de autor în lucrările [Petcuț 2010a], [Dragomir 2010a].

### 2.1. Problematika modelării celulelor și panourilor fotovoltaice

Celule și panourile fotovoltaice, reprezintă dispozitive de conversie fotovoltaică a energiei solare, de tip generatoare electrice, caracterizate prin dependențe complexe între mărimile caracteristice care permit exprimarea legăturii dispozitivului fotovoltaic cu circuitul de sarcină: tensiunea la borne  $V$  și curentul  $I$ , respectiv puterea transmisă la borne  $P=I \cdot V$ . Ca urmare, prezintă importanță caracteristica externă  $I(V)$  și caracteristică  $P(V)$  derivabilă din prima.

Caracteristica  $I(V)$  depinde de mai mulți factori: tehnologia de fabricație, intensitatea luminoasă  $G$ , distribuția spectrală a acesteia, temperatura exterioară, condițiile concrete de utilizare și mentenanță. Ca atare, caracterizarea unui dispozitiv fotovoltaic se face printr-o familie de caracteristici având ca parametri valorile intensității luminoase și temperaturii externe. Datorită numărului mare de factori care o influențează, caracteristica externă astfel definită are în orice moment un grad ridicat de incertitudine.

Complexitatea situației face ca standardele existente să stipuleze condiții pretențioase de determinare a caracteristicilor. Un exemplu în acest sens este standardul american ASTM E 1036-96 [ASTM 1036] și variantele lui ulterioare precum și standardul echivalent IEC 60904-1 [IEC 60904]. Cu toate acestea, caracteristicile determinate pe baza unor astfel de standarde se pot utiliza practic doar pentru compararea dispozitivelor fotovoltaice. Fiind determinate în condiții ideale, care mai apoi nu sunt respectate în practică, caracteristicile obținute pe baza standardelor sunt, pentru utilizarea curentă, doar orientative.

Aprecierea efectivă a unui dispozitiv fotovoltaic se realizează din punct de vedere practic prin intermediul următorilor parametri asociați unei caracteristici externe: curentul de scurtcircuit  $I_{SC}$ , tensiunea de mers în gol sau de circuit deschis

$V_{OC}$ , puterea maximă  $P_{max}$ , factorul de umplere  $FF$  determinat pentru punctul de putere maximă și randamentul dispozitivului.

În acest context, din punct de vedere practic este important să se opereze cu caracteristici care să corespundă cât mai bine condițiilor reale de funcționare, accesibile utilizatorului și care să se preteze la dezvoltarea de strategii de conducere eficiente.

Pentru a descrie caracteristica  $I(V)$  în scopul exploatării optime a unui dispozitiv fotovoltaic și a sintetizării unor structuri de conducere adecvate, este necesar ca familiei de caracteristici ale dispozitivului să i asocieze un model matematic. Așa cum se arată în [Dragomir 2010a], caracteristicile  $I(V)$  și  $P(V)$  ale modulelor și panourilor fotovoltaice se aseamănă ca aspect foarte mult cu cele ale celulelor. Pe această bază pentru diferitele tipuri de dispozitive fotovoltaice se pot folosi modele matematice de același tip. Atunci când parametrilor acestor modele li se asociază o semnificație fizică, de exemplu de rezistență electrică sau un anumit tip de tensiune sau curent, acestea se consideră ca valori echivalente ale dispozitivului raportate la un anumit model conceptual. Pe această bază o serie de referiri făcute în continuare sunt comune tuturor dispozitivelor fotovoltaice.

Astfel, în contextul schemei electrice din Fig. 1.1-2, punctul de funcționare al unui dispozitiv fotovoltaic care debitează pe o sarcină rezistivă  $R_L$  se află la intersecția caracteristicii  $I(V)$  a dispozitivului cu dreapta de sarcină (Fig. 2.1-1):

$$I = \frac{1}{R_L} V.$$

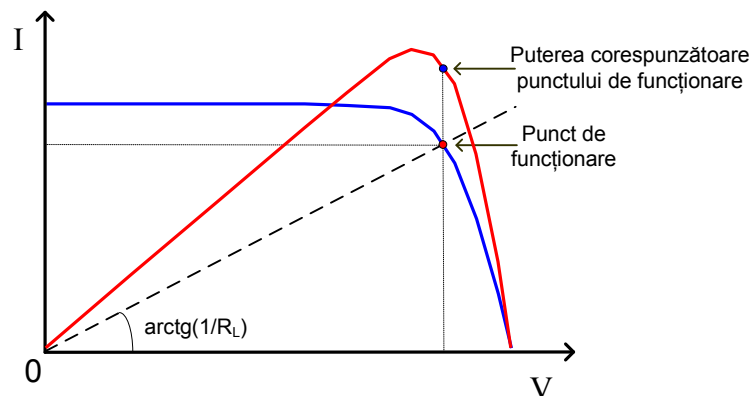


Fig. 2.1-1. Stabilirea punctului de funcționare al unui dispozitiv fotovoltaic

În Fig. 2.1-2 sunt reprezentate familii de caracteristici externe obținute pentru diferite intensități ale radiației solare și pentru diferite temperaturi de lucru. Anvergura caracteristicii  $I(V)$  este dependentă de intensitatea radiației solare  $G$  și de temperatura de lucru  $\theta$  a dispozitivului. Ca urmare a acestor influențe punctul de funcționare poate sau nu să coincidă cu punctul de putere maximă. La modificarea valorii lui  $R_L$  se modifică panta dreptei de sarcină, iar odată cu creșterea valorii lui  $R_L$  crește tensiunea la bornele dispozitivului.

Un model al unui dispozitiv fotovoltaic, indiferent de calea pe care este obținut, trebuie să aproximeze cât mai bine caracteristicile  $I(V)$  obținute experimental. Pentru a obține o aproximare bună, modelul trebuie să sintetizeze informații din mai multe caracteristici experimentale  $I(V)$ , determinate pentru valori diferite, dar constante, ale lui  $G$  și  $\theta$ .

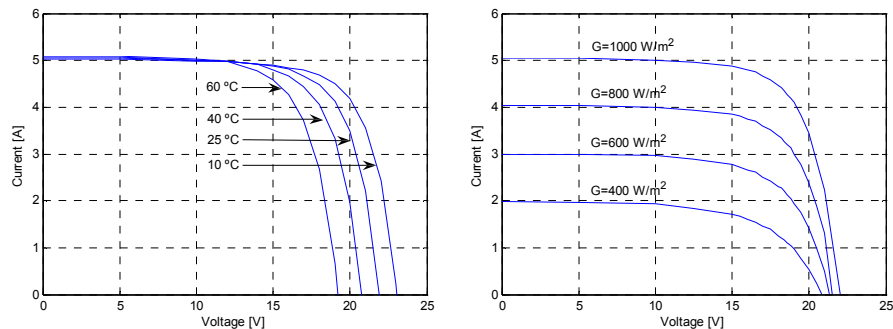


Fig. 2.1-2. Familii de caracteristici  $I(V)$  pentru diferite intensități ale radiației solare  $G$  și temperaturi ale celulei/panoului  $\theta$  [Tafticht 2008]

Deoarece se dorește utilizarea dispozitivului în vecinătatea punctului de putere maximă, la un randamentul cât mai înalt, este necesar ca modelul să permită determinarea ușoară a punctului de funcționare curent al dispozitivului, respectiv al punctului de putere maximă.

În paragrafele următoare sunt prezentate principalele modele folosite pentru dispozitivele fotovoltaice și modul de obținere a unui punct de funcționare curent respectiv a punctului de putere maximă. După proveniență, se disting trei tipuri de modele:

- *modele parametrice bazate pe scheme electrice echivalente* (paragraful 2.2);
- *modele parametrice empirice* (paragraful 2.3);
- *modele neparametrice interpolative* (paragraful 2.4).

Primele două tipuri sunt modele analitice și au, în consecință, un caracter general. Cel de al treilea tip, bazat pe reprezentarea caracteristicilor prin puncte determinate experimental, memorate și utilizate prin interpolare în raport cu tensiunea și curentul la nivelul fiecărei caracteristici, și pe interpolare în raport atât cu tensiunea și curentul cât și cu parametri între caracteristici, nu au un caracter general. Nici unul dintre tipuri nu este standardizat. Este standardizată doar metodologia de obținere experimentală a punctelor unei caracteristici externe.

## 2.2. Modele bazate pe scheme electrice echivalente

Plecând de la procesele de generare și transfer de purtători de sarcină electrică ce au loc în celulele fotovoltaice au fost imaginate scheme electrice echivalente cărora li se pot asocia modele matematice potrivit teoremelor lui Kirchhoff. Ele sunt concepute în ipoteza că procesele de generare și transfer de purtători de sarcină electrică se consideră că au loc instantaneu, astfel că toate modele avute în vedere sunt neinertiale, adică fără mărimi de stare. Spunem că schemele electrice echivalente reprezintă modele conceptuale de tip circuit electric și că ecuațiile circuitului reprezintă modele matematice bazate pe scheme electrice echivalente. În modelele conceptuale celula apare ca un circuit generator de curent format dintr-o sursă ideală de curent și din elemente pasive neinertiale, neliniare și liniare, independente de sarcina conectată (Fig. 2.2-1).



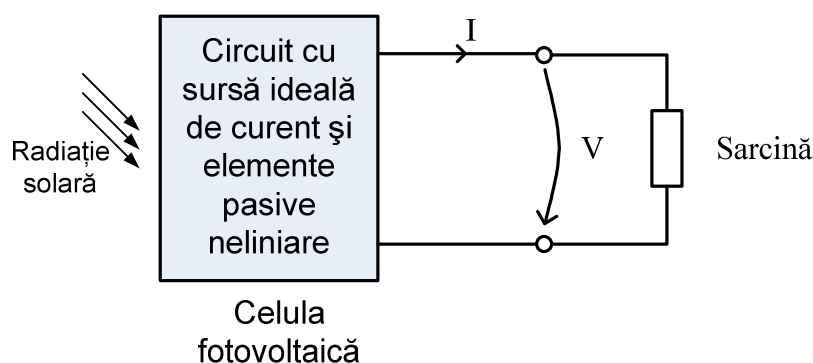


Fig. 2.2-1. Ansamblul celulă – circuit de sarcină utilizat în modelarea matematică

Pentru modelarea matematică a celulei trebuie să avem în vedere faptul că celula împreună cu sarcina reprezintă din punct de vedere sistemic un ansamblu inseparabil, în sensul că punctul de funcționare al ansamblului este dat de intersecția caracteristicii externe a celulei cu caracteristica circuitului de sarcină. În acest context vorbim despre *modelul matematic al ansamblului celulă-circuit de sarcină* alcătuit din *ecuațiile celulei și ecuațiile circuitului de sarcină*, sau din *modelul matematic al celulei și modelul matematic al circuitului de sarcină*. Din punct de vedere sistemic ansamblul celulă-circuit de sarcină (Fig. 2.2-1) are ca mărime de intrare nivelul intensității radiației solare, sau curentul  $I_{ph}$  al sursei ideale de curent asociată celulei/panoului, iar ca mărime de ieșire curentul de sarcină  $I$  și/sau tensiunea la borne  $V$ .

În secțiunile următoare se detaliază câteva modele obținute în diferite ipoteze. Datorită caracterului neinerțial al componentelor schemelor echivalente, ecuațiile celulei sunt valabile atât pentru regimurile staționare cât și pentru regimurile dinamice.

În ipoteza că sarcina este de tip neinerțial, pentru modelarea ei considerăm o ecuație de forma:

$$V = F_L(I), \quad (2.2-1)$$

iar dacă este de tip inerțial, acest model se înlocuiește cu ecuații adecvate proceselor din circuitul sarcinii.

### 2.2.1. Modelul cu o diodă (M-1D)

Un prim model conceptual, de aproximare a comportării celulei reale, este cel din Fig. 2.2-2, format dintr-o sursă ideală de curent și o diodă [\*\*\*, 2008]. Acest model este utilizat în numeroase lucrări care vizează aspecte de modelare [Lopes 2003], [\*\*\* 2005], [Sera 2006], [Sera 2008a], [Valentini 2008], [Koutroulis 2009].

La apariția luminii sursa de curent devine activă producând în circuit un curent dependent de intensitatea radiației solare. Acest curent este modelat de fotocurentul  $I_{ph}$  care se distribuie între circuitul intern (corespunzător disipării de energie în celulă) redat prin dioda  $D$  (curentul  $I_D$ ) și circuitul extern redat prin „sarcină” (curentului  $I$ ).

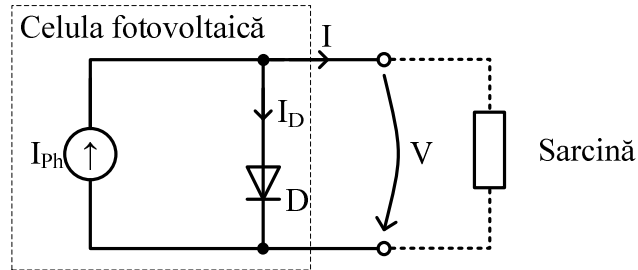


Fig. 2.2-2. Model simplu cu o diodă (M-1D)

Celulei  $i$  se asociază modelul matematic:

$$\begin{cases} I = I_{ph} - I_D \\ I_D = F_{I_D}(V) \end{cases} \quad (2.2-2)$$

sau

$$I = I_{ph} - F_{I_D}(V) \quad (2.2-3)$$

Utilizarea acestui model presupune cunoașterea legăturii neliniare  $I_D = F_{I_D}(V)$  (caracteristica diodei  $D$ ), dependentă de temperatură și de alți factori.

Considerând pentru curentul  $I_D$  expresia corespunzătoare diodei Shockley [\*\*\*, 2005], adică:

$$I_D = F_{I_D}(V) = I_0 \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (2.2-4)$$

(2.2-3) devine:

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \quad (2.2-5)$$

Parametrul  $V_T$  (tensiune) redă influența temperaturii asupra efectelor neliniare de tip diodă. Conform [\*\*\*, 2005], [\*\*\*, 2008],  $V_T$  poate fi aproximată cu relația:

$$V_T = \frac{n \cdot k \cdot T}{q} \quad (2.2-6)$$

în care  $n$  este factorul de idealitate pentru diodă (diode ideality factor) (1 pentru dioda ideală),  $k$  este constanta Boltzmann,  $T$  este temperatura de lucru a diodei  $D$  exprimată în  $^{\circ}K$ , iar  $q$  este sarcina electrică elementară.

Potrivit relației (2.2-5)  $M-1D$  are 3 parametri:  $I_{ph}$ ,  $I_0$  și  $V_T$ , ale căror valori depind de intensitatea radiației solare ( $G$ ) și temperatură ( $\theta$ ). Astfel, (2.2-5) sau (2.2-3) descriu o familie de caracteristici.

Din punct de vedere sistemic dispozitivul descris prin familia de caracteristici externe este utilizat potrivit schemei bloc din Fig. 2.2-3a: în funcție de  $G$  sau  $I_{ph}$ , de  $\theta$  și de circuitul de sarcină rezultă un punct de funcționare pe caracteristica  $I(V)$ . În rezolvarea problemelor curente, dispozitivul este interpretat din punct de vedere informațional prin scheme bloc ca și cele din Fig. 2.2-3b sau Fig. 2.2-3c, după cum mărimea de ieșire (care trebuie calculată) este tensiunea  $V$  sau curentul  $I$ . Prezența circuitului exterior se consideră în primul caz prin curentul  $I$ , iar în al doilea caz prin tensiunea  $V$ .

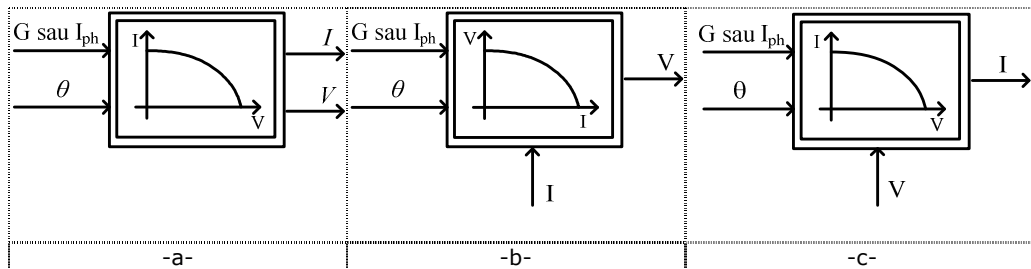


Fig. 2.2-3. Scheme bloc ale celulelor și panourilor fotovoltaice

M-1D este un model de aproximare a celulei/panoului real datorită, pe de-o parte, faptului că prin elementele din schemă nu se poate ține seama și de defectele materialului și de rezistențele căii de interfațare cu sarcina, iar pe de altă parte faptului că modelul nu poate reda suficient de bine efectul real de diodă care apare în dispozitivul fotovoltaic. Ca urmare, capacitatea modelului de a aproxima caracteristicile  $I(V)$  reale este scăzută [\*\*\*, 2005].

### 2.2.2. Modelul cu o diodă extins (M-1De)

Modelul cu o diodă extins surprinde, prin elemente rezistive suplimentare introduse în M-1D, defectele de cristal. El are aspectul din Fig. 2.2-4. Aspecte privind utilizarea modelului și deducerea lui apar în numeroase lucrări, bunăoară: [Chegaar 2004a], [Chegaar 2004b], [Park 2004], [\*\*\* 2005], [Soto 2006], [Bouzidi 2007], [Campbell 2007], [Lal 2007], [Petreuş 2008], [Tafticht 2008], [\*\*\* 2008], [Chu 2009], [Liquin 2009], [Moldovan 2009], [Petreuş 2009], [Piazza 2009], [Skoplaki 2009], [Alam 2010], [Khan 2010], [Nehaoua 2010], [Lee 2011], [Mitroi 2011], [Wang 2011], [Chouder 2012]. Conform [\*\*\*, 2005] M-1De este considerat modelul standard al celulei fotovoltaice.

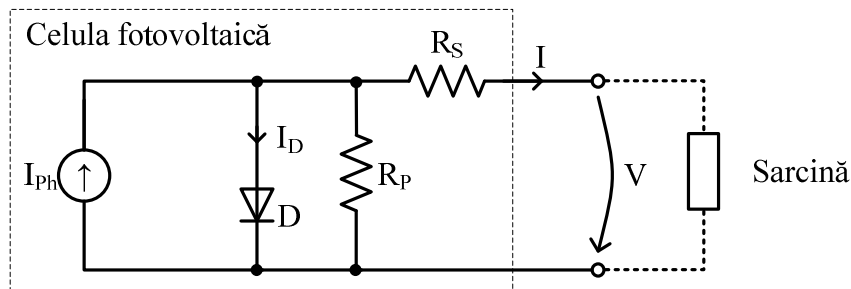


Fig. 2.2-4. Model cu o diodă extins (M-1De)

Elementele suplimentare ale modelului cu o diodă extins sunt o rezistență serie  $R_S$  și o rezistență paralel  $R_p$ . Rezistența  $R_p$  modelează defectele din cristal (neomogenități și defecte de material) care conduc la curenți de pierdere care traversează jonctiunea  $p-n$ . La celule solare bine construite, defectele sunt minore, astfel că această rezistență este relativ mare, între  $100 \Omega - 100000 \Omega$  [Castaner 2002]. Cu rezistența  $R_S$  se surprinde contextul fenomenologic are ca efect creșterea rezistenței căii de interfațare cu circuitul exterior (în principal: rezistența semiconductorului, rezistența contactelor și a legăturilor). Este de dorit ca valoare

acestei rezistențe să fie cât mai mică [Francisco, 2005]. Ca și ordin de mărime,  $R_S$  este între  $0.0001 \Omega$  și  $0.1 \Omega$  [Castaner, 2002].

Modelul matematic asociat schemei din Fig. 2.2-4 este:

$$\begin{cases} I = I_{ph} - I_D - \frac{V + I \cdot R_S}{R_p} \\ I_D = F_{I_D}(V) \end{cases}, \quad (2.2-7)$$

sau

$$I = I_{ph} - F_{I_D}(V) - \frac{V + I \cdot R_S}{R_p}, \quad (2.2-8)$$

În acest caz, datorită rezistențelor  $R_S$  și  $R_p$ , expresia curentului  $I_D$  (în ipoteza că avem de a face cu o diodă Shockley) este [\*\*\*, 2005]:

$$I_D = F_{I_D}(V) = I_0 \left( e^{\frac{V + I \cdot R_S}{V_T}} - 1 \right), \quad (2.2-9)$$

iar (2.2-8) devine:

$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V + I \cdot R_S}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_S}{R_p}. \quad (2.2-10)$$

Tensiunea  $V_T$  este aproximată ca și în cazul modelului cu o diodă prin relația (2.2-6).

Modelul cu o diodă extins are 5 parametri:  $I_{ph}$ ,  $R_S$ ,  $R_p$ ,  $I_0$ , și  $V_T$ .

Din punct de vedere sistemic, se folosesc tot reprezentările din Fig. 2.2-3.

Aproximarea caracteristicilor experimentale  $I(V)$  cu acest model este bună [\*\*\*, 2005].

### 2.2.3. Modelul cu două diode (M-2D)

Modelul cu două diode, reprezentat în Fig. 2.2-5, are în plus față de modelul cu o diodă extins, dioda  $D_2$  care, din punctul de vedere al modelării, servește pentru a reduce diferențele care apar între caracteristicile  $I(V)$  obținabile cu modelul M-1De și cele experimentale. Ansamblul celor 2 diode redă mai bine efectul de diodă din dispozitivele fotovoltaice reale [\*\*\*, 2008]. Conform [\*\*\*, 2005], M-2D permite o aproximare foarte bună a caracteristicii experimentale  $I(V)$ , în special pentru nivele scăzute ale intensității radiației solare. În lucrările [Petreuş 2008], [Singh 2008], [Tafticht 2008], [Ishaque 2011a], [Ishaque 2011b], [Ishaque 2011c], [Ishaque 2011d], a fost utilizat acest model sub forma relației (2.2-14).

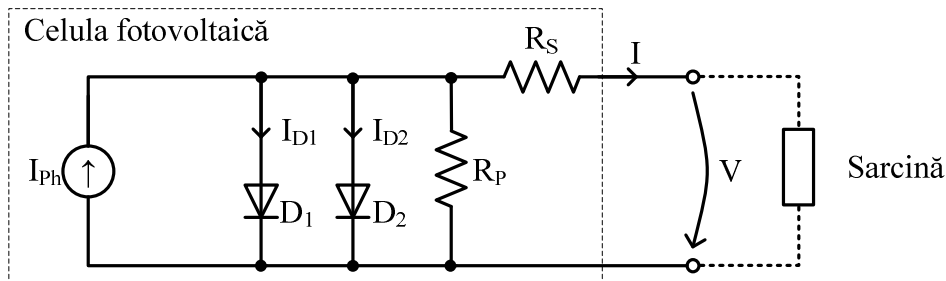


Fig. 2.2-5 Model extins cu două diode (M-2D)

În continuare, în majoritatea demersurilor din teză, se folosește modelul M-2D. În paragraful 2.4 se prezintă o comparație între modele.

Ecuatiile modelului cu două diode sunt:

$$\begin{cases} I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - \frac{V + I \cdot R_S}{R_p} \\ I_{D1} = F_{I_{D1}}(V) \\ I_{D2} = F_{I_{D2}}(V) \end{cases}, \quad (2.2-11)$$

reductibile la

$$I = I_{ph} - F_{I_{D1}}(V) - F_{I_{D2}}(V) - \frac{V + I \cdot R_S}{R_p}, \quad (2.2-12)$$

Considerând pentru curenții  $I_{D1}$  și  $I_{D2}$  expresii corespunzătoare diodelor Shockley [\*\*\* 2005]:

$$\begin{cases} I_{D1} = F_{I_{D1}}(V) = I_{01} \left( e^{\frac{V + I \cdot R_S}{V_{T1}}} - 1 \right) \\ I_{D2} = F_{I_{D2}}(V) = I_{02} \left( e^{\frac{V + I \cdot R_S}{V_{T2}}} - 1 \right) \end{cases}, \quad (2.2-13)$$

(2.2-12) devine:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left( e^{\frac{V + I \cdot R_S}{V_{T1}}} - 1 \right) - I_{02} \left( e^{\frac{V + I \cdot R_S}{V_{T2}}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_S}{R_p}, \quad (2.2-14)$$

unde:

$$V_{T1} = \frac{n_1 \cdot k \cdot T_1}{q}, \quad V_{T2} = \frac{n_2 \cdot k \cdot T_2}{q}. \quad (2.2-15)$$

În ecuațiile de mai sus  $n_1$  și  $n_2$  sunt factorii de idealitate ai diodelor  $D_1$ , respectiv  $D_2$ , iar  $T_1$  și  $T_2$  sunt temperaturile de lucru ale diodelor  $D_1$ , respectiv  $D_2$  exprimate în  $^{\circ}K$ .

Acest model are, ca urmare a extensiei circuitului, un număr de 7 parametrii:  $I_{ph}$ ,  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ ,  $R_p$ ,  $R_s$ ,  $V_{T1}$  și  $V_{T2}$ .

Schemele bloc din Fig. 2.2-3 se aplică și pentru acest model.

Există și variante modificate ale acestui model, ca de exemplu cea din [Kassis 2010], în care pe una din laturile de circuit cu diodă se înscrie un rezistor care surprinde, mai în detaliu, unul dintre procesele de disipare din interiorul celulei.

### 2.3. Modele empirice

Sub denumirea de modele empirice sunt cuprinse modelele matematice care descriu caracteristica externă  $I(V)$  a panourilor fotovoltaice pe cale matematică, fără a mai porni de la un model conceptual. Modelele empirice se obțin prin diferite procedee de identificare, fără a se mai recurge la o schemă electrică echivalentă. Astfel de modele sunt propuse de mai mulți autori. În cele ce urmează sunt redată

modele empirice dezvoltate în lucrarea [Petreuş, 2008]. Ulterior, publicării acestei lucrări, o echipă de cercetare din cadrul UPT, din care a făcut parte și autorul tezei, a realizat împreună cu echipa de cercetare de la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, căreia i-a aparținut lucrarea menționată, un studiu referitor la precizia modelelor empirice comparativ cu modelul de tip schemă electrică cu două diode. Studiul a constituit obiectul lucrării [Dragomir 2010a].

Privind modelele empirice prezentate în continuare, ca funcții strict matematice, trebuie observat că ele exploatează asemănarea dintre caracteristicile  $I(V)$  experimentale și funcțiile de tip exponențial, logaritmic sau putere.

### 2.3.1. Modelul empiric 1 (M-E1)

Sub denumirea de model empiric 1 al caracteristicii  $I(V)$  se consideră, în acord cu [Petreuş 2008], modelul descris prin ecuația:

$$I = I_{SC} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{I_{sat}}{I_{SC}} \right) e^{\frac{V+I \cdot R_{Se}}{V_T}} \right] \quad (2.3-1)$$

în care  $V_T = \frac{n \cdot k \cdot T}{q}$ .

Acest model are 4 parametri:  $I_{SC}$ ,  $I_{sat}$ ,  $R_{Se}$  și  $V_T$ . Din măsurători sau din datele de catalog se pot obține  $I_{SC}$  și  $T$ . Dacă considerăm dioda ideală ( $n = 1$ ) și adoptăm o valoare pentru  $T$ , respectiv determinăm experimental pe  $I_{SC}$ , mai rămân de determinat 2 parametri:  $I_{sat}$  și  $R_{Se}$ .

### 2.3.2. Modelul empiric 2 (M-E2)

Model empiric 2 descrie caracteristica  $I(V)$  prin ecuația [Petreuş, 2008]:

$$V = V_{OC} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{b} \cdot \ln \frac{I_{SC} - I}{I_{SC}} \right] - R_{Se} \cdot I, \quad (2.3-2)$$

unde  $b = \ln(I_{SC}/I_{sat})$  (v. și relația (2.3-1)).

Modelul are 4 parametri:  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $b$  și  $R_{Se}$ . Dacă  $V_{OC}$  și  $I_{SC}$  se obțin din măsurători sau din date de catalog, atunci rămân de determinat doi parametri. M-E2 nu redă o dependență explicită a modelului celulei/panoului fotovoltaic în raport cu temperatura.

### 2.3.3. Modelul empiric 3 (M-E3)

Acest model empiric consideră caracteristica externă  $I(V)$  redată de ecuația [Petreuş, 2008]:

$$I = I_{SC} \cdot \left( 1 - \left( \frac{V}{V_{OC}} \right)^{k_e} \right) \quad (2.3-3)$$

în care apar 3 parametri:  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$  și  $k_e$ . Întrucât  $I_{SC}$  și  $V_{OC}$  pot fi măsurate experimental, din punctul de vedere al identificării, modelul (2.3-3) are un singur parametru necunoscut:  $k_e$ . El poate fi aproximat cu formula:

$$k_e = \ln \left( 1 - \frac{I_X \text{ mas}}{I_{SC}} \right) / \ln \left( \frac{V_X \text{ mas}}{V_{OC}} \right), \quad (2.3-4)$$

unde  $(V_{x\ mas}, I_{x\ mas})$  sunt coordonatele punctului de putere maximă determinat cu aproximare de pe caracteristicile celulei.

## 2.4. Modele interpolative

Prin modele de tip interpolativ înțelegem în cele ce urmează un ansamblu de caracteristici  $I(V)$  redade prin puncte, așa cum se obțin prin măsurători, împreună cu procedeele de interpolare folosite pentru obținerea unui punct curent, pentru valori date ale lui  $G$  și  $\theta$ . Ideea a fost explicată în finalul paragrafului 2.1. Modele de tip interpolativ reprezintă un caz particular de modele numerice.

Un model de tip interpolativ presupune memorarea prin puncte a unui număr, uneori foarte mare, de caracteristici externe. De exemplu, standardul de testare al panourilor fotovoltaice ASTM E 1036-96 pretinde pentru module și panouri fotovoltaice 36 de caracteristici  $I(V)$  determinate pentru 6 valori ale temperaturii panoului și pentru 6 valori ale intensității radiației solare. De aceea, diferiți autori au elaborat metode de obținere a modelelor interpolative pe baza unui număr redus de caracteristici experimentale. Sunt de reținut lucrările [Marion 2004] și [Tsuno 2009] în care se prezintă metode bazate pe determinarea experimentală a numai 4 caracteristici  $I(V)$  pentru diferite valori ale intensității radiației solare  $G$  respectiv ale temperaturii panoului  $\theta$ .

Metoda de generare a caracteristicilor prezentată în [Marion 2004] se bazează pe utilizarea unui algoritm de interpolare biliniară. Cele 4 caracteristici determinate experimental trebuie să corespundă la două intensități ale radiației solare și la două temperaturi ale mediului exterior care să încadreze superior și inferior valorile lui  $G$  și  $\theta$  pentru care se dorește noua caracteristică. Algoritmul de interpolare vizează, succesiv, obținerea prin interpolare liniară a tensiunii în circuit deschis  $V_{OC}$ , a curentului de scurtcircuit  $I_{SC}$ , și apoi, prin interpolare biliniară, a punctelor unei noi caracteristici externe. Rezultatele obținute, foarte bune, au fost confirmate pe module fotovoltaice produse prin mai multe tehnologii, prin măsurări în laborator și în mediu natural. Principalul dezavantaj al acestei metode este faptul că metodă de translatare-deplasare propusă nu ține cont de modificarea factorului de umplere  $FF$ .

Ideea metodei este ilustrată în Fig. 2.4-1. Aici, valorile intensităților radiației solare sunt egale pentru caracteristicile (1)-(2) respectiv (3)-(4) ( $G_1 = G_2$  și  $G_3 = G_4$ ), iar valorile temperaturilor sunt egale pentru caracteristicile (1)-(3) respectiv (2)-(4) ( $\theta_1 = \theta_3$  și  $\theta_2 = \theta_4$ ). Din caracteristicile (1) și (2) se obține prin interpolare liniară în raport cu  $\theta$  caracteristica (5) ( $G_1 = G_2$ ,  $\theta = \theta_i$  - temperatura la valoare intermediară), iar din caracteristicile (3) și (4) se obține prin interpolare liniară, tot în raport cu  $\theta$  caracteristica (6) ( $G_3 = G_4$ ,  $\theta = \theta_i$  - temperatura la valoare intermediară). Apoi, din caracteristicile (5) și (6) se obține, tot prin interpolare liniară în raport cu  $G$ , caracteristica (7) (pentru o valoare intermediară a intensității radiație solare  $G_i$  la valoare intermediară  $\theta_i$  a temperaturii).

O abordare asemănătoare este prezentată în [Tsuno 2009]. Și aici se pornește de la 4 caracteristici  $I(V)$  măsurate pentru 2 valori ale intensității radiației solare  $G$  ( $G_1 = G_2, G_3 = G_4$ ) dar pentru 4 valori diferite ale lui  $\theta$  ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ ), fără obligativitatea de a avea  $\theta_1 = \theta_3$  și/sau  $\theta_2 = \theta_4$ , realizându-se o succesiune de interpolări liniare conform schemei bloc din Fig. 2.4-2. Pentru obținerea prin interpolare a caracteristicii corespunzătoare unei perechi de valori fixate ale intensității radiației solare și temperaturii,  $G = G_x, \theta = \theta_x$ , sunt parcurși următorii pași principali:

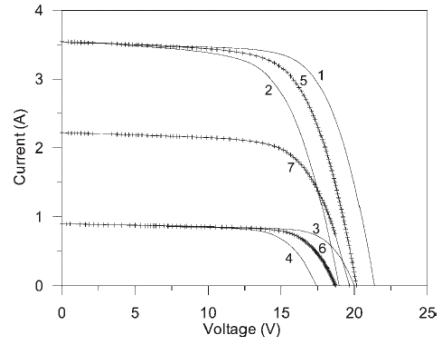


Fig. 2.4-1. Metoda de interpolare din [Marion 2004]

1. Introducerea caracteristicilor externe 1 și 2: caracteristica 1 are parametrii  $G = G_1, \theta = \theta_1$ , iar caracteristica 2 are parametrii  $G = G_1, \theta = \theta_2$ ;
2. Calculare coeficientului  $a_1$  necesar interpolării.
3. Inițializarea limitei superioare a curentului  $I_1$  (corespunzător caracteristicii 1), la valoarea curentului de scurt circuit  $I_{SC1}$ , și extragerea valorii corespunzătoare a lui  $V$  de pe caracteristica 1.
4. Calcularea curentului  $I_2$  de pe caracteristica 2, corespunzător curentului  $I_1$  de pe caracteristica 1 (prin respectarea condiției  $I_2 - I_1 = I_{SC2} - I_{SC1}$ ) și extragerea valorii corespunzătoare a lui  $V$  de pe caracteristica 2.
5. Realizarea interpolării liniare între punctele  $(V_1, I_1)$  și  $(V_2, I_2)$ . cu ajutorul relațiilor (2.4-1 și 2.4-2)
 
$$I_5 = I_1 + a_1(I_2 - I_1), \quad V_5 = V_1 + a_1(V_2 - V_1) \quad (2.4-1), (2.4-2)$$
 în care  $a_1$  este calculat la pasul 2. Astfel se obține un punct pe caracteristica 5, rezultatul fiind memorat ca punct  $(I, V)$  corespunzătoare lui  $G_5, \theta_x$ .
6. Se verifică dacă a fost parcursă toată caracteristica 1  $I(V)$ .
  - în cazul în care nu s-a finalizat parcurgerea se trece la pasul 7;
  - în cazul în care s-a finalizat parcurgerea se trece la pasul 8.
7. Se incrementează valoarea curentului  $I_1$  și se revine la pasul 4.
8. Se reiau pașii 1÷7 dar de data aceasta pentru alte 2 caracteristici: caracteristica 3 cu parametrii  $G = G_3, \theta = \theta_3$  și caracteristica 4 cu parametrii  $G = G_4, \theta = \theta_4$ .
12. Realizarea interpolării liniare între punctele  $(V_3, I_3)$  și  $(V_4, I_4)$  cu ajutorul unor relații similare relațiilor (2.4-1) și (2.4-2). Astfel se obține un punct pe caracteristica 6, rezultatul fiind memorat ca punct  $(I, V)$  corespunzător valorilor  $G_3, \theta_x$ .
13. Se verifică dacă a fost parcursă toată caracteristica 3:
  - în cazul în care nu s-a finalizat parcurgerea se trece la pasul 14;
  - în cazul în care s-a finalizat parcurgerea se trece la pasul 15.
15. Se reiau pașii 1÷7 pentru perechea de caracteristici obținute după părăsirea pașilor 6÷13, caracteristica 5 cu parametrii  $G = G_1, \theta = \theta_x$ , și caracteristica 6 cu parametrii  $G = G_3, \theta = \theta_x$ .
19. Realizarea interpolării liniare între punctele  $(V_5, I_5)$  și  $(V_6, I_6)$  folosind relații similare relațiilor (2.4-1) și (2.4-2). Rezultatul este memorat ca punct  $(I, V)$  corespunzător  $G_x, \theta_x$  al caracteristicii dorite 7.



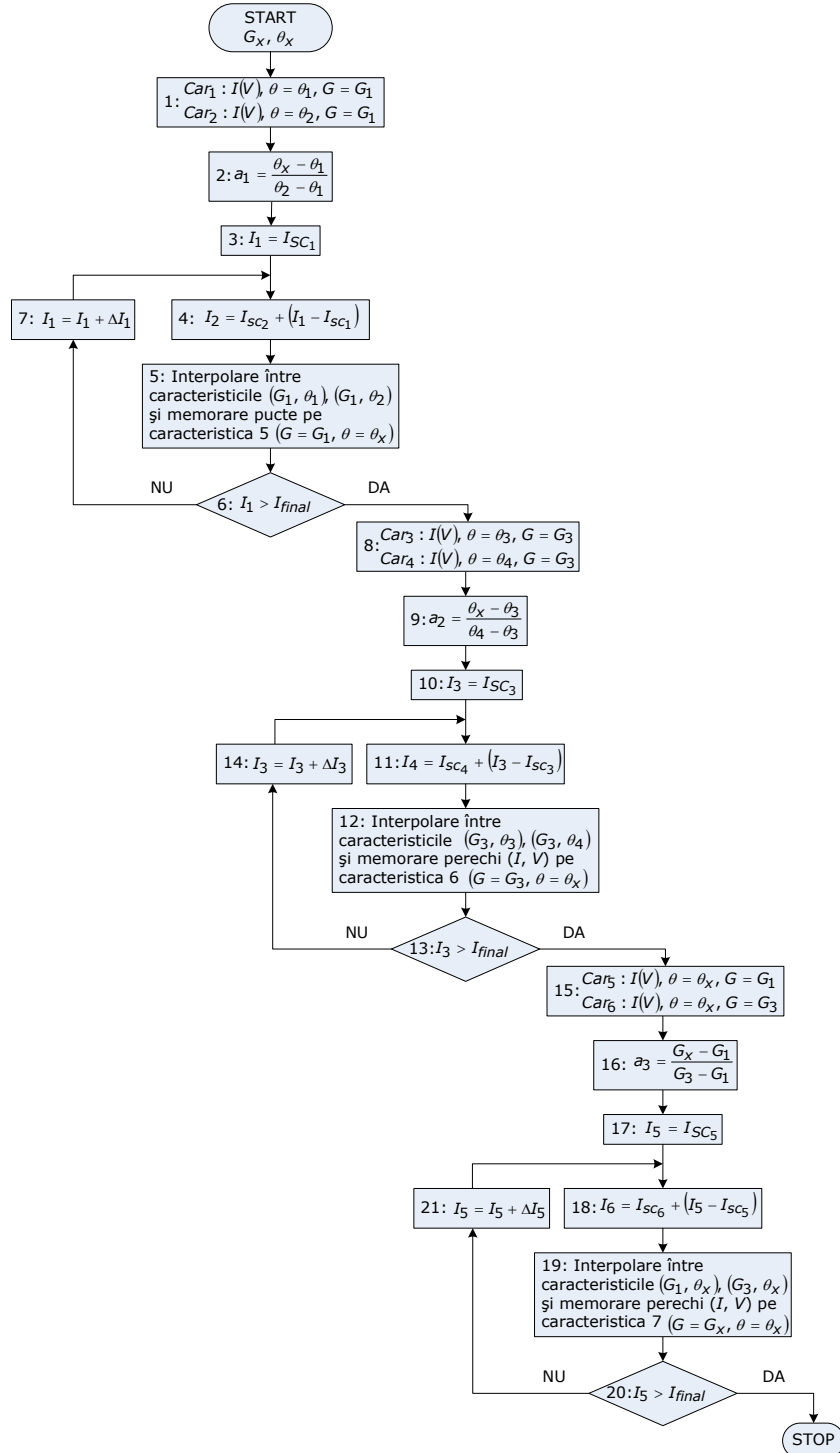


Fig. 2.4-2. Metoda Tsuno de obținere a unei caracteristici externe - schemă bloc de interpolare

20. Se verifică dacă a fost parcursă toată caracteristica 7.

- în cazul în care nu s-a finalizat parcurgerea se trece la pasul 21;
- în cazul în care s-a finalizat parcurgerea se consideră încheiat calculul caracteristicii dorite.

Astfel, prin parcurgerea celor 21 de pași, se obține caracteristica  $I(V)$  corespunzătoare  $G = G_x, \theta = \theta_x$ . Valoarea lui  $\Delta I_x$  se alege în funcție de precizia de reprezentare dorită și de metoda de interpolare folosită pentru fiecare caracteristică experimentală.

## 2.5. Extragerea de puncte din modelele caracteristicilor $I(V)$

Având un model al caracteristicii  $I(V)$  al unui dispozitiv fotovoltaic, dat sub una dintre formele din paragrafele 2.2 ÷ 2.4 se pune problema determinării lui  $V$ , atunci când se cunoaște valoarea lui  $I$ , sau invers (v. Fig. 2.2-3). În acest context vorbim despre extragerea de puncte din modelele caracteristicilor  $I(V)$ . Extragerea este necesară în diferite scopuri, de exemplu pentru emulare de caracteristici, pentru calcule de identificare (bunăoară, determinarea parametrilor modelelor folosind algoritmi genetici), sau pentru implementare de algoritmi de conducere.

Potrivit paragrafelor menționate extragerea de puncte vizează: i) modelele matematice: (2.2-5) pentru M-1D [\*\*\* 2008], (2.2-10) pentru M-1De, (2.2-14) pentru M-2D; ii) modelele matematice (2.3-1) pentru M-E1 [Petreuş 2008], [Dragomir 2010a], (2.3-2) pentru M-E2 [Petreuş 2008], [Dragomir 2010a] și (2.3-3) pentru M-E3 [Petreuş 2008], [Dragomir 2010a]; iii) modelele interpolative implementate prin puncte și algoritmi de interpolare. Problema obținerii punctelor se pune în ipoteza că în fiecare caz parametri caracteristicilor, corespunzători unei perechi de valori constante ale temperaturii  $\theta$  și intensității radiației solare  $G$ , sunt dați.

Pentru modelele interpolative extragerea valorii unei coordonate a punctului de funcționare, atunci când se cunoaște valoarea celeilalte coordonate, este implicită. În cazul modelelor M-1D, M-E2 și M-E3 extragerea se reduce la simple operații de substituție în formulele date sau în formule derivate din acestea. În cazul modelului M-E1 egalitatea (2.3-1) poate fi folosită prin substituție sau prin transformare într-o ecuație transcendentă a cărei soluționare nu ridică probleme.

Pentru modele M-1De și M-2D punctele caracteristicii nu se mai pot obține prin substituție datorită faptului că modelele (2.2-10) și (2.2-14) conduc la ecuații de tip Lambert, care reprezintă o categorie de ecuații transcendente care ridică anumite probleme de rezolvare. În continuare expunerea se focalizează numai pe problema obținerii punctelor caracteristicilor  $I(V)$  corespunzătoare acestor modele. Se prezintă o metodă de calcul implementată în programul de identificare al caracteristicilor externe folosind algoritmi genetici (v. paragraful 2.6), metodă publicată în lucrarea [Petcuț 2010a].

Din considerente de restrângere a prezentării ne referim numai la modelul (2.2-14). După cum se consideră dată valoarea lui  $I$  sau valoarea lui  $V$ , (2.2-14) devine o ecuație de tip Lambert, de nedeterminată  $V$  respectiv  $I$ . Caracteristica acestui tip de ecuație este faptul că ecuația rezultată în fiecare caz este o ecuație transcendentă care nu permite explicitarea nedeterminatei. Pentru a rezolva ecuația se poate recurge în principiu la mai multe metode. În principal intră în discuție

metode numerice aplicate direct sau metode numerice aplicate prin intermediul unor medii de simulare existente.

Datorită complexității asociate implementărilor și inițializărilor din cazul metodelor numerice aplicate direct am optat pentru rezolvarea ecuației prin utilizarea mediului de simulare Matlab/Simulink larg răspândit.

În acest context se pune problema rezolvării ecuației:

$$I = I_{ph} - I_{01} \left( e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T1}}} - 1 \right) - I_{02} \left( e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T2}}} - 1 \right) - \frac{V+I \cdot R_S}{R_p},$$

de nedeterminată  $I$ , atunci când se cunoaște valoarea lui  $V$ . Orice implementare a acestei ecuații printr-o schemă Simulink conduce la un model Simulink a cărui structură prezintă o conexiune cu reacție și care, în lipsa unei variabile de stare, se lovește de efectul de „bucă algebrică” (algebraic loop) care blochează calculul.

Pentru a elimina acest impediment asociem ecuației (2.2-14) ecuația diferențială de ordinul I:

$$T_{temp} \frac{dI(t)}{dt} + I(t) = I_{ph} - I_{01} \left( e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T1}}} - 1 \right) - I_{02} \left( e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T2}}} - 1 \right) - \frac{V+I \cdot R_S}{R_p}, \quad (2.5-1)$$

în care parametrul  $T_{temp} > 0$ , are rol de constantă de timp. Se observă că (2.5-1) reprezintă modelul unui sistem dinamic de ordinul I, orientat  $V \rightarrow I$ , care în regim permanent constant (atunci când derivata  $dI/dt=0$ ) ia tocmai forma modelului (2.2-14). Ca urmare, obținerea unui punct  $(V, I)$  se reduce la obținerea valorii mărimii de ieșire  $I$  a sistemului (2.5-1) în regimul permanent constant corespunzător unei valori date pentru  $V$ . Pentru ca această abordare să fie valabilă, este necesar ca sistemul neliniar (2.5-1) să fie pe de o parte stabil iar pe de alta parte pentru fiecare valoare al lui  $V$  să aibă un singur punct de echilibru. În ipoteza că sistemul este stabil, parametrul  $T_{temp}$  se va adopta astfel încât regimul permanent constant să fie atins practic într-un interval de timp convenabil.

Pentru a demonstra stabilitatea sistemului (2.5-1) și unicitatea punctului de echilibru definim funcția ajutătoare:

$$f(I) = I - I_{ph} + I_{01} \left( e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T1}}} - 1 \right) + I_{02} \left( e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T2}}} - 1 \right) + \frac{V+I \cdot R_S}{R_p}. \quad (2.5-2)$$

Astfel, sistemul (2.5-1) devine:

$$T_{temp} \frac{dI(t)}{dt} + f(I(t)) = 0, \quad (2.5-3)$$

iar ecuația (2.2-14) corespunzătoare regimului permanent constant al acestui sistem ia forma:

$$f(I) = 0. \quad (2.5-4)$$

Întrucât  $f$  este continuă pe  $\mathbf{R}$ ,  $\lim_{I \rightarrow -\infty} f(I) = -\infty$  și  $\lim_{I \rightarrow \infty} f(I) = \infty$ , rezultă că

$\frac{df(I)}{dI} = 1 + I_{01} \cdot \frac{R_S}{V_{T1}} \cdot e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T1}}} + I_{02} \cdot \frac{R_S}{V_{T2}} \cdot e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T2}}} + \frac{R_S}{R_p} > 0$ . Deci,  $f$  este strict crescătoare având

imaginea  $Im f = (-\infty, +\infty)$  și un singur punct de trecere prin valoarea 0. Așadar, ecuația  $f(I) = 0$  are soluție unică. Fie  $I_0$  soluția ecuației (2.5-4) obținută pentru  $V = V_0$ . Atunci pentru  $I < I_0$  avem  $f(I) < 0$  respectiv  $dI(t)/dt > 0$ , iar pentru  $I > I_0$

avem  $f(I) > 0$  respectiv  $df(I)/dI < 0$ . Ca urmare, punctul de echilibru al sistemului (2.5-3) este stabil iar stabilitatea se manifestă pentru orice valoare inițială  $I(0)$  a lui  $I$ , în particular din domeniul de lucru  $[I_{OC}, I_{SC}]$ .

Ecuatiei (2.5-1) îi corespunde modelul Simulink din Fig. 2.5-1. De remarcă în cadrul modelului structura cu reacție negativă. Mărimile afectate de indicele ( $k$ ) corespund punctului caracteristicii  $I(V)$ , iar mărimile afectate de indicele ( $ind$ ) corespund parametrilor modelului. Aplicarea unui semnal treaptă prin modificarea valorii lui  $V$ , va declanșa un proces tranzitoriu care, practic, se va stabiliza după în cel mult  $5 T_{temp}$  secunde. Blocurile „to Workspace” servesc pentru extragerea punctelor caracteristicii  $I(V)$  din mulțimea perechilor de valori ( $V, I$ ) care apar pe parcursul regimurilor tranzitorii. Salvarea valorilor lui  $I$  (mărimii de ieșire) se face într-un vector.

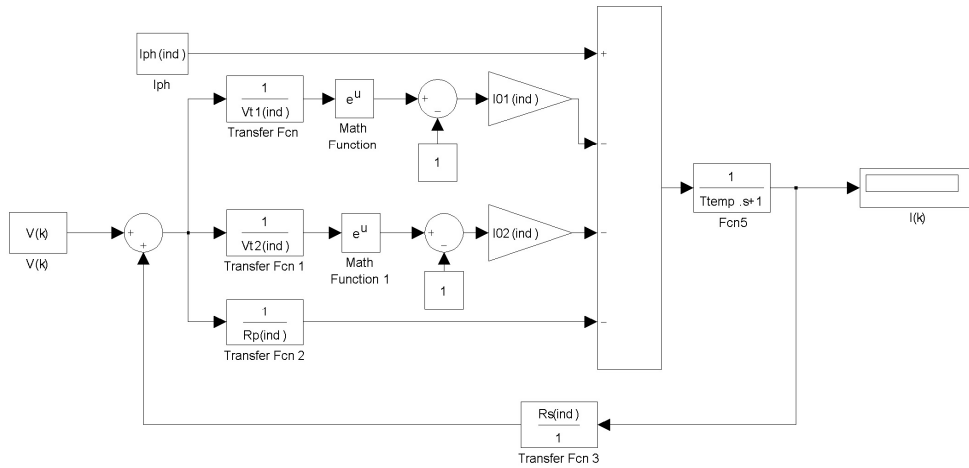


Fig. 2.5-1. Schema Simulink atașată modelului (2.5-1)

Pentru a genera mai multe puncte ale caracteristicii  $I(V)$  modelul trebuie folosit succesiv pentru mai multe valori ale tensiunii  $V$ , activate la momente diferite corelate cu valoarea constantei de timp  $T_{temp}$ . În acest scop se folosește un model Simulink ca și cel din Fig. 2.5-2, momentele de generare a obținerii diferitelor puncte corespunzând momentelor de aplicare a semnalelor treaptă.

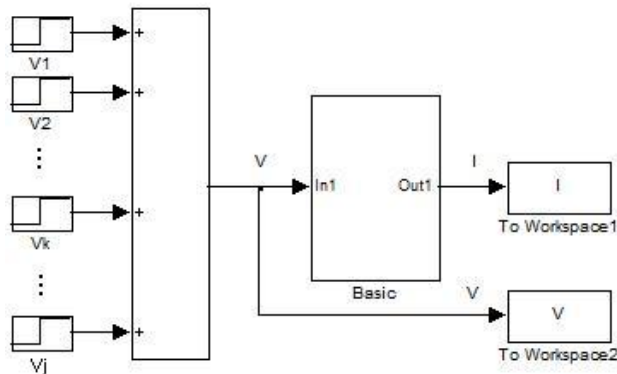


Fig. 2.5-2. Schema Simulink pentru obținerea prin puncte a caracteristicii  $I(V)$  - *Generare caracteristică  $I(V)$*

În continuare este prezentat un exemplu de determinare a punctelor unei caracteristici  $I(V)$ , de ecuație (2.2-14) și implementată prin schema din Fig. 2.5-1 cu parametri  $I_{ph}=0.453$  A,  $I_{01}=12.5 \cdot 10^{-11}$  A,  $I_{02}=25 \cdot 10^{-9}$  A,  $R_s=0.3$   $\Omega$ ,  $R_p=47.7$   $\Omega$ ,  $V_{T1}=25.7 \cdot 10^{-3}$  V și  $V_{T2}=51.4 \cdot 10^{-3}$  V,  $n_1=1$ ,  $n_2=2$ . S-a adoptat  $T_{temp}=0.025$  sec., ceea ce din punct de vedere practic înseamnă o stabilizare în cel mult 0.25 secunde. La intrarea schemei din Fig. 2.5-2 s-au aplicat 12 valori ale lui  $V$ , începând cu valoarea de scurtcircuit,  $V=0$ , și terminând cu valoarea de mers în gol,  $V=0.565$  Volt (Fig. 2.5-3):

$$V \in \{0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.35, 0.4, 0.45, 0.475, 0.5, 0.525, 0.55, 0.565\}$$

sau

$$V(t) = 0.1 \cdot \sigma(t - 1.3) + 0.1 \cdot \sigma(t - 1.5) + 0.1 \cdot \sigma(t - 1.7) + 0.05 \cdot \sigma(t - 1.9) + \dots \\ \dots + 0.015 \cdot \sigma(t - 3.3)$$

Răspunsul sistemului este ilustrat în Fig. 2.5-4.

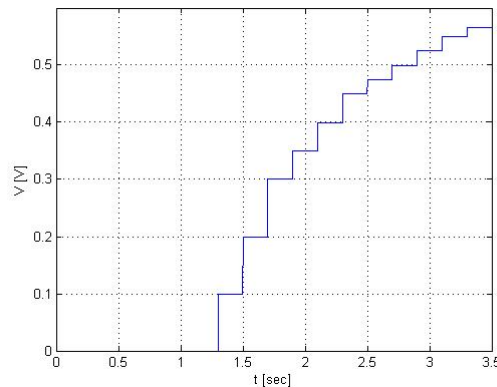


Fig. 2.5-3. Semnalul de intrare aplicat conform schemei din Fig. 2.5-2

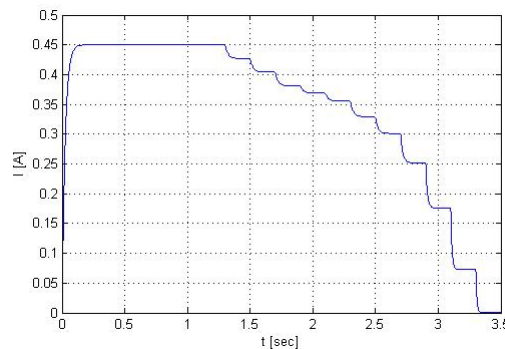


Fig. 2.5-4. Răspunsul sistemului din Fig. 2.5-2 la semnalul de intrare din Fig. 2.5-3

Din Fig. 2.5-4 se observă că timpul de stabilizare al mărimii de ieșire variază între 0.05 sec și 0.15 sec, în funcție de amplitudinea treptei de la intrare. Șirului de valori ale lui  $V$  îi corespunde potrivit Fig. 2.5-4 șirul de valori (Amper):

$$I \in \{0.45, 0.44, 0.426, 0.408, 0.396, 0.385, 0.354, 0.318, 0.260, 0.181, 0.081, 0\}$$

În Fig. 2.5-5 se prezintă caracteristica determinată prin punctele obținute pe această cale.

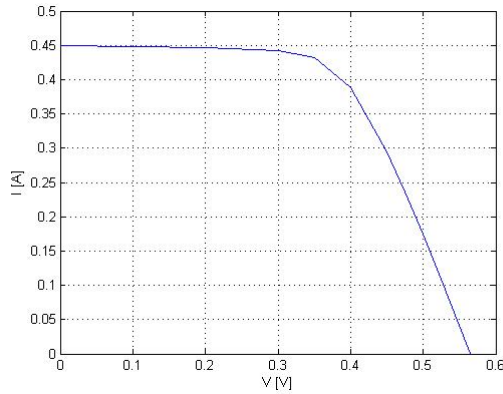


Fig. 2.5-5. Caracteristica  $I(V)$  calculată cu modelul M-2D cu parametrii:  $I_{ph}=0.453\text{ A}$ ,  $I_{01}=12.5 \cdot 10^{-11}\text{ A}$ ,  $I_{02}=25 \cdot 10^{-9}\text{ A}$ ,  $R_S=0.3\ \Omega$ ,  $R_P=47.7\ \Omega$ ,  $V_{T1}=25.7 \cdot 10^{-3}\text{ V}$  și  $V_{T2}=51.4 \cdot 10^{-3}\text{ V}$

Pentru cazul în care se cunoaște valoarea lui  $I$  și se dorește determinarea lui  $V$  (orientarea sistemului este  $(I \rightarrow V)$ ), relația echivalentă lui (2.5-1) este:

$$T_{temp} \frac{dI(t)}{dt} + V(t) = R_P \cdot \left[ I_{ph} - I_{01} \cdot \left( e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T1}}} - 1 \right) - I_{02} \cdot \left( e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T2}}} - 1 \right) \right] - (R_P + R_S) \cdot I \quad (2.5-5)$$

Schema Simulink utilizată în acest caz este prezentată în Fig. 2.5-6.

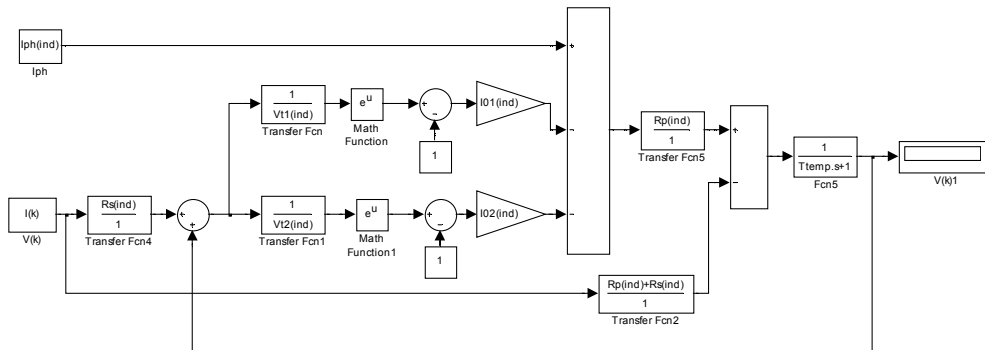


Fig. 2.5-6. Schema Simulink atașată modelului (2.5-5)

Pentru ca valorile mărimii de ieșire  $V$  să se stabilizeze, este necesar ca inițializarea lui  $I$  să respecte condiția:  $I(0) < \frac{R_P}{R_P + R_S} I_{ph}$ .

## 2.6. Determinarea parametrilor modelelor dispozitivelor fotovoltaice

Parametrii modelelor matematice ale unui dispozitiv fotovoltaic se pot determina prin mai multe metode. Toate metodele expuse în continuare se bazează pe caracteristici determinate experimental.

În [Petreuş 2008] sunt prezentate metode de determinare a parametrilor pentru modelele M-E1, M-E2 și M-E3, iar în [Tafticht 2008], [Bouzidi 2007], [Moldovan 2009] pentru modelele M-1De. În acest context autorul tezei s-a orientat, în primul rând, spre determinarea parametrilor pentru M-2D. Datorită particularităților modelului (M-2D), am considerat că estimarea parametrilor se poate face folosind algoritmi genetici. Metoda este, evident, aplicabilă și celorlalte tipuri de modele. Deoarece, egalitățile de forma (2.2-14), privite, după caz, ca ecuații în raport cu  $I$ , atunci când se cunoaște valoarea lui  $V$ , respectiv ca ecuații în raport cu  $V$ , atunci când se cunoaște valoarea lui  $I$ , devin ecuații de tip Lambert, rezolvarea lor este posibilă numai pe cale numerică, prin aproximare.

Întrucât caracteristica (1) din Fig. 1.1-4 are ca parametrii temperatura externă și intensitatea radiației solare, caracteristicile experimentale cărora li se asociază diferitele modele matematice trebuie să fie ridicate pentru valori constante ale celor doi parametri.

Pe de altă parte, din punctul de vedere al modelelor matematice temperatura luată în considerare, prin formule de tipul (2.2-6) și (2.2-15), este temperatura de lucru a diodelor echivalente, adică a domeniului din celulă căruia i se asociază efectul de diodă. Practic, idealizăm situația considerând că temperatura de lucru depinde numai de temperatura externă și neglijând efectul curentului de sarcină. În această ipoteză parametrul urmărit este temperatura externă  $\theta$ .

În continuare se prezintă modul de estimare a parametrilor modelelor dispozitivelor fotovoltaice cu ajutorul algoritmilor genetici, precum și cu ajutorul unei funcții Mathcad de minimizare a erorii  $minerr()$ . De asemenea, este prezentată o metoda numerică de rezolvare prin aproximare a ecuațiilor de forma (2.2-14).

### 2.6.1. Estimarea parametrilor modelelor dispozitivelor fotovoltaice folosind algoritmi genetici (EP-AG)

Estimarea parametrilor unei celule fotovoltaice sau panou fotovoltaic, folosind algoritmi genetici, este aplicabilă tuturor modelelor prezentate în paragraful 2.3. Rezultatele obținute de autor pentru celule fotovoltaice și modelul M-2D au fost publicate în lucrarea [Petcuș 2010a], iar rezultatele obținute pentru panouri fotovoltaice în lucrarea [Dragomir 2010a]. În cea de a doua lucrare au fost folosite mai multe metode de identificare, mai multe modele și s-a procedat la o analiză comparativă a rezultatelor.

Metoda de estimare se bazează pe utilizarea unei caracteristici  $I(V)$  determinată experimental, reținută sub forma unei mulțimi de perechi de puncte  $\{(V_{k\text{ mas}}, I_{k\text{ mas}})\}_{k=1,j}$  (Tabelul 2.6-1), și pe considerarea ca individ (cromozom) a mulțimii (setului) parametrilor modelului matematic adoptat pentru caracteristica  $I(V)$ . Obiectivul estimării îl constituie determinarea unui "cel mai bun set" de parametri în acord cu un criteriu de optimizare asociat printr-o funcție fitness adoptată pentru compararea caracteristicilor  $I(V)$  furnizate de model cu caracteristica  $I(V)$  experimentală.

**Tabelul 2.6-1:** Organizarea datelor experimentale.

Index k \ Valori	1	2	3	...	j
$I_{k\ mas}$	$I_{1\ mas}$	$I_{2\ mas}$	$I_{3\ mas}$	...	$I_{j\ mas}$
$V_{k\ mas}$	$V_{1\ mas}$	$V_{2\ mas}$	$V_{3\ mas}$	...	$V_{j\ mas}$

Pașii care se parcurg în vederea estimării parametrilor sunt descriși în ordinograma din Fig. 2.6-1. Pe baza ei au fost scrise diferitele programe de calcul prezentate în Anexa 2.1

În sinteză, conținutul pașilor parcurși este următorul:

1. *Inițializarea aplicației* - constând în:
  - *Adoptarea parametrilor necesari rulării aplicației:*
    - i.  $N_{max}$  - numărul maxim de generații,
    - ii.  $a$  - numărul celor mai performanți indivizi păstrați de la o generație la alta,
    - iii.  $\beta$  - numărul descendenților dintr-o generație obținuți prin încrucișare,
    - iv.  $\gamma$  - numărul descendenților dintr-o generație obținuți prin mutație,
    - v.  $j$  - numărul punctelor caracteristicii  $I(V)$  determinate experimental (punctele din tabelul 2.1),
    - vi.  $q$  - numărul de indivizi dintr-o generație,
    - vii.  $c_k$  - coeficienții de ponderare a termenilor din funcția fitness
    - viii.  $p$  - plaja (exprimată în %) în care se generează aleator parametrii indivizilor generației inițiale în raport cu parametrii individului inițial,
    - ix.  $Z_{p\hat{i}}$  - coeficientul zonei „descendent încrucișare” (Fig. 2.6-2),  $Z_{p\hat{i}} \in (0,1)$
    - x.  $Z_{pm}$  - coeficientul zonei „descendent mutație” (Fig. 2.6-3),  $Z_{pm} \in (0,1)$ .
  - *Introducerea punctelor caracteristicii determinate experimental* ( $V_{k\ mas}, I_{k\ mas}$ ) în vectorii de lucru:  

$$V_{mas} = (V_{1\ mas}, V_{2\ mas}, \dots, V_{j\ mas})^T$$
 și  

$$I_{mas} = (I_{1\ mas}, I_{2\ mas}, \dots, I_{j\ mas})^T.$$
  - *Generarea individului inițial.* Operația este necesară pentru generarea unei populații inițiale. Generarea se face prin operații specifice fiecărui model, de regulă cvasiempiric, ținând seama de intervalele în care parametri pot lua valori.
2. *Generarea populației inițiale (de q indivizi)* (constituie populația curentă de generație 1) cu valorile parametrilor într-o plajă de  $\pm p\%$  față de valorile parametrilor individului inițial. Populația inițială devine generația curentă. În majoritatea situațiilor din teză s-a lucrat cu  $q=20$  indivizi și  $p = \pm 20\%$ .
3. *Generarea prin puncte a caracteristicii  $I(V)$  pentru fiecare individ din populația curentă.*
  - Generarea constă în calcularea valorilor  $I(V_{k\ mas}), k = \overline{1, j}$ , pentru



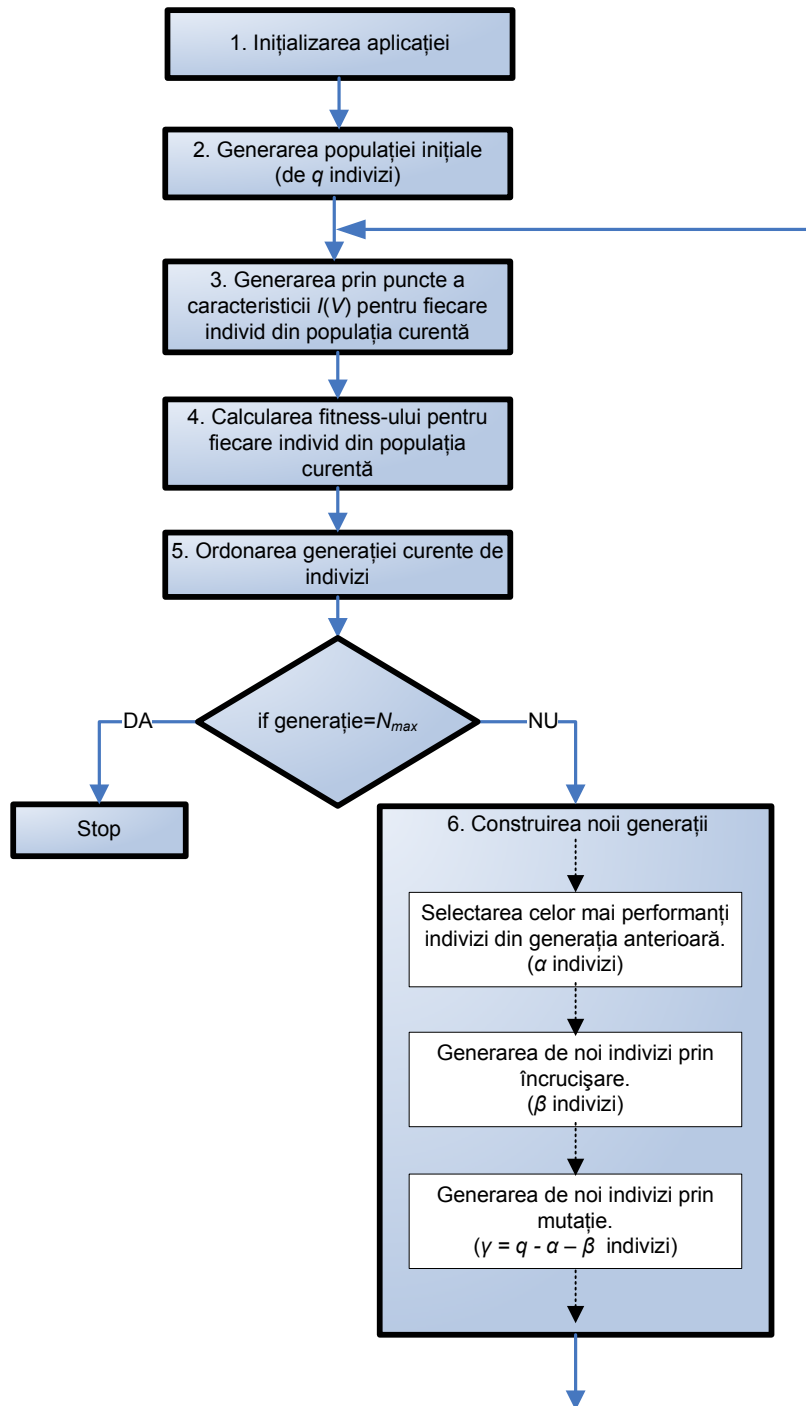


Fig. 2.6-1. Ordinograma metodei de determinare a parametrilor modelului matematic al unui dispozitiv fotovoltaic folosind algoritmi genetici

fiecare individ din generația curentă. Valorile obținute pentru curenți, corespunzătoare valorilor din vectorul  $V_{mas} = (V_{1\_mas}, V_{2\_mas}, \dots, V_{j\_mas})^T$ , sunt salvate în vectorul  $I_{ind\_calc} = (I_{ind1\_calc}, I_{ind2\_calc}, \dots, I_{indj\_calc})^T$  unde  $ind = \overline{1, q}$  și  $I_{ind\_calc} = I_{ind\_calc}(V_{k\_mas})$ ,  $k = \overline{1, j}$ . Calculul are și în acest caz aspecte specifice determinate de modelul matematic utilizat așa cum s-a arătat în paragraful 2.5. Astfel, cu excepția modelelor M-1De și M-2D, calculul constă într-o simplă substituție. Pentru modelul M-2D metoda de calcul a fost prezentată în paragraful 2.5.

4. *Calcularea fitness-ului pentru fiecare individ din generația curentă* ( $ind = \overline{1, q}$ ). Variantele de funcții fitness utilizabile cel mai frecvent utilizate sunt:

$$fitness_{ind\_GA1} = \left| \sum_{k=1}^j c_k \frac{I_{mas}(V_{k\_mas}) - I_{ind\_calc}(V_{k\_mas})}{I_{mas}(V_{k\_mas}) + I_{ind\_calc}(V_{k\_mas})} \right|, \quad ind = \overline{1, q}; \quad (2.6-1)$$

$$fitness_{ind\_GA2} = \sqrt{\sum_{k=1}^j c_k^2 (I_{mas}(V_{k\_mas}) - I_{ind\_calc}(V_{k\_mas}))^2}, \quad ind = \overline{1, q}; \quad (2.6-2)$$

$$fitness_{ind\_GA3} = \sqrt{\sum_{k=1}^j c_k^2 (P_{mas}(V_{k\_mas}) - P_{ind\_calc}(V_{k\_mas}))^2}, \quad ind = \overline{1, q}, \quad (2.6-3)$$

unde

- $c_k$  sunt coeficienți de ponderare a diferiților termeni
- $I_{mas}(V_{k\_mas})$ ,  $k = \overline{1, j}$  este curentul măsurat atunci când  $V = V_{k\_mas}$  (conform Tabelul 2.6-1)
- $I_{ind\_calc}(V_{k\_mas})$ ,  $k = \overline{1, j}$  este curentul calculat cu ajutorul modelului adoptat pentru tensiunea  $V = V_{k\_mas}$
- $P_{mas}(V_{k\_mas}) = I_{k\_mas} \cdot V_{k\_mas}$  este puterea debitată de dispozitivul fotovoltaic în punctul de măsură  $k$ ,  $k = \overline{1, j}$ .
- $P_{ind\_calc}(V_{k\_mas}) = I_{ind\_calc}(V_{k\_mas}) \cdot V_{k\_mas}$  este puterea calculată în punctul de calcul corespunzător tensiunii  $V_{k\_mas}$ ,  $k = \overline{1, j}$ .

5. *Ordonarea generației curenți de indivizi*, în mod descrescător după valorile fitness-ului calculate la punctul 4. Cel mai performant individ din generația curentă ajunge pe prima poziție.

Dacă numărul curent al generației nu depășește  $N_{max}$  se trece la pasul 6.

Dacă este atins  $N_{max}$ , parametrii celui mai performant individ sunt salvați ca parametri finali ai celulei-panoului.

6. *Construirea noii generații prin:*

- păstrarea celor mai performanți  $\alpha$  indivizi din generația ordonată la punctul 5. În majoritatea cazurilor din teză am folosit  $\alpha = 10$ ;
- generarea unui număr de  $\beta$  indivizi prin încrucișare. De regulă s-a ales o variantă de încrucișare intermediară;

- generarea unui număr de  $\gamma = q - a - \beta$  indivizi prin mutație.

Pentru operația de încrucișare intermediară se selectează doi părinți  $P_A$  și  $P_B$  folosind o selecție de tip ruletă pe baza fitness-urilor calculate în pasul 4. Pentru fiecare parametru în parte se consideră o zonă extinsă față de intervalul definit de cei doi parametri denumită zonă descendent „încrucișare intermediară” potrivit principiului ilustrat în Fig. 2.6-2. În Fig. 2.6-2,  $Z_i$  este zona admisă pentru descendenții. Valorile descendentului sunt generate aleator în interiorul zonei  $Z_i$ .

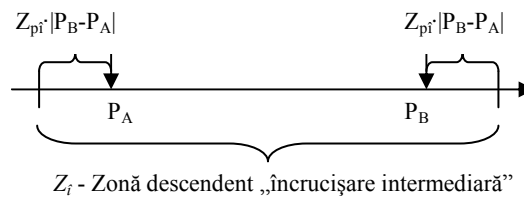


Fig. 2.6-2. Zonă descendent „încrucișare intermediară”

Mutația se aplică unor indivizi aleși aleatoriu din populația anterioară, modificând doar un singur parametru al individului selectat. Pentru fiecare parametru modificat, valorile descendentului sunt în interiorul așa-numitei zone descendent „mutație”  $Z_m$ , o vecinătate a valorii  $P_M$  a parametrului părintelui (Fig. 2.6-3).

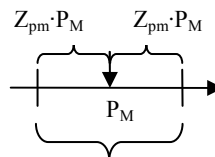


Fig. 2.6-3. Zonă descendent „mutație”

### 2.6.2. Estimarea parametrilor modelului M-2D folosind algoritmi genetici

Metoda de estimare a parametrilor modelului M-2D se referă la modelul (2.2-14) și a fost publicată de autor în lucrarea [Petcuț 2010a]. Determinarea celor 7 parametri ( $I_{ph}$ ,  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ ,  $R_p$ ,  $R_s$ ,  $V_{T1}$ ,  $V_{T2}$ ) se bazează pe obținerea a 5 dintre ei cu ajutorul algoritmilor genetici și calcularea celorlalți 2 în funcție de cei 5 pe baza relațiilor de legătură dintre curentul de sarcină și tensiunea la borne corespunzătoare punctelor de scurtcircuit ( $V=0$ ,  $I=I_{SC}$ ) și mers în gol ( $V=V_{OC}$ ,  $I=0$ ), puncte ușor de obținut experimental.

În acest context adoptăm ca parametrii calculabili în funcție de restul parametrilor pe  $R_p$ ,  $I_{ph}$ . Formulele de calcul ale celor doi parametri se obțin prin particularizarea modelului (2.2-14).

Astfel, pentru  $V=V_{OC}$  și  $I=I_{OC}=0$ , (2.2-14) devine

$$0 = I_{ph} - I_{01} \left( e^{\frac{V_{OC}}{V_{T1}}} - 1 \right) - I_{02} \left( e^{\frac{V_{OC}}{V_{T2}}} - 1 \right) - \frac{V_{OC}}{R_p} \quad (2.6-4)$$

respectiv

$$I_{ph} = I_{01} \left( e^{\frac{V_{oc}}{V_{T1}} - 1} \right) + I_{02} \left( e^{\frac{V_{oc}}{V_{T2}} - 1} \right) + \frac{V_{oc}}{R_p} \quad , \quad (2.6-5)$$

iar pentru  $I = I_{SC}$  și  $V = V_{SC} = 0$  tot din (2.2-14) deducem că

$$I_{SC} = I_{ph} - I_{01} \left( e^{\frac{I_{SC} R_S}{V_{T1}} - 1} \right) - I_{02} \left( e^{\frac{I_{SC} R_S}{V_{T2}} - 1} \right) - \frac{I_{SC} \cdot R_S}{R_p} \quad . \quad (2.6-6)$$

Înlocuind pe  $I_{ph}$  din (2.6-5) în (2.6-6), obținem formula de calcul a valorii lui  $R_p$  în funcție de  $R_S$ ,  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ ,  $V_{T1}$ ,  $V_{T2}$ :

$$R_p = \frac{V_{oc} - I_{SC} R_S}{I_{SC} - I_{01} \left( e^{\frac{V_{oc}}{V_{T1}} - e^{\frac{I_{SC} R_S}{V_{T1}}} \right) - I_{02} \left( e^{\frac{V_{oc}}{V_{T2}} - e^{\frac{I_{SC} R_S}{V_{T2}}} \right)} \quad (2.6-7)$$

iar înlocuind rezultatul în (2.6-5) se obține formula de calcul a lui  $I_{ph}$ .

În ipoteza că  $V_{T1}$  și  $V_{T2}$  se estimează cu formulele (2.2-15) și având în vedere că  $R_p$  și  $I_{ph}$  se pot calcula cu formulele (2.6-5) și (2.6-7) în funcție de restul parametrilor, problema identificării se reduce la determinarea a numai trei parametri  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  și  $R_S$ . Situația este denumită în continuare *cazul I*, un individ fiind definit prin tripletul ( $I_{01}$ ,  $I_{02}$ ,  $R_S$ ).

Dacă nu folosim relațiile (2.2-15) identificarea constă în determinarea pe bază experimentală a 5 parametri:  $V_{T1}$ ,  $V_{T2}$ ,  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  și  $R_S$ . Situația este denumită în continuare *cazul II*. În acest caz un individ este definit prin cvint-uplul ( $V_{T1}$ ,  $V_{T2}$ ,  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ ,  $R_S$ ).

### 2.6.3. Estimarea parametrilor pentru M-E1 și M-E2

Pentru aceste modele considerăm cunoscute valorile  $V_{oc}$  și  $I_{SC}$ , estimarea parametrilor rezumându-se la determinarea lui  $I_{sat}$  și  $R_{se}$  în cazul M-E1 respectiv a lui  $b$  și  $R_{se}$  în cazul M-E2. În lucrarea [Dragomir 2010a], la care autorul tezei este coautor, rezultate obținute în colaborare (UPT - Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca), sunt prezentate 2 metode de determinare a acestor parametri, prima propusă de colectivul de la UPT, iar a doua propusă de colectivul de la UTCN. În continuare ne referim doar la M-E1 (cu parametrii  $I_{sat}$  și  $R_{se}$ ).

Prima metodă de estimare a parametrilor se bazează pe algoritmi genetici și am notat-o în continuare cu EP-AG-E1. Ea se bazează pe aplicarea metodei prezentate în paragraful 2.6.1, adaptată pentru determinarea unui număr de 2 parametri ( $I_{sat}$  și  $R_{se}$ ).

A doua metodă folosește pentru determinarea parametrilor o funcție Mathcad, notată  $minerr(b, R_{se})$ , bazată pe o metodă de regresie, metoda realizând minimizarea erorii

$$E_{r1}(I_{sat}, R_{se}) = \sum_{k=1}^j \left| \frac{V_{k\_mas} - V(I_{k\_mas}, I_{sat}, R_{se})}{V_{i\_mas} + V(I_{k\_mas}, I_{sat}, R_{se})} \right| \quad (2.6-8).$$

Metoda este notată în continuare cu EP-Math-E1. Inițializarea parametrilor  $I_{sat}$  și  $R_{se}$  se face cvasiempiric.

#### 2.6.4. Estimarea parametrilor pentru M-E3

Ca și în cazul M-E1/M-E2, considerăm cunoscute valorile pentru  $V_{OC}$  respectiv  $I_{SC}$ . Dacă cunoaștem coordonatele MPP,  $k_e$  poate fi aproximat cu ajutorul relației (2.3-4). În cazul în care se dorește o determinare mai exactă, se pot utiliza atât metoda bazată pe algoritmi genetici cât și metoda bazată pe minimizarea erorii cu ajutorul funcției  $minerr()$  din Mathcad.

În cazul utilizării algoritmilor genetici se folosește o particularizare a metodei prezentate în paragraful 2.6.1, notată în continuare EP-AG-E3.

În cazul utilizării funcției  $minerr(k_e)$  din Mathcad, eroarea se estimează cu funcția criteriu:

$$E_{r2}(k_e) = \sum_{k=1}^j \left| \frac{I_{k\_mas} - I(V_{k\_mas}, k_e)}{I_{k\_mas} + I(V_{k\_mas}, k_e)} \right| \quad (2.6-9)$$

Această metodă este notată în continuare cu EP-Math-E3.

### 2.7. Comparații între metodele de determinare a parametrilor dispozitivelor fotovoltaice pentru diferite modele utilizate

În scopul identificării ariei de aplicare a diferitelor modele și metode de estimare prezente este necesară o analiză comparativă a acestora. Fiecare model are unul sau mai mulți parametri care pot fi determinați prin diferite metode.

Majoritatea rezultatelor din acest paragraf au fost publicate în lucrarea [Dragomir 2010a]. Rezultatele pentru M-E1, M-E2 și M-E3 au fost obținute împreună cu colectivul de la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca.

Studiul a fost efectuat pentru două panouri, notate în continuare cu PV\_P<sub>1</sub> respectiv PV\_P<sub>2</sub>.

PV\_P<sub>1</sub> este un panou LD 664431, produs de LD Systems AG&Co KG [PVP\_1], fiind un panou de mici dimensiuni destinat "activităților de laborator". Acest panou este alcătuit din 20 de celule înseriate, suprafața unei celule fiind de 12.5 cm<sup>2</sup>.

PV\_P<sub>2</sub> este un panou ASE 30-DG-UT-68V/32W, produs de ASE Americas, Inc.[PVP\_2], fiind un panou de dimensiuni medii care pentru aplicații de mici dimensiuni poate fi utilizat independent. Specificațiile date de producător sunt  $P_{MPP} = 32W$ ,  $I_{SC} = 0.6A$ ,  $V_{OC} = 93V$ ,  $V_{MPP} = 68V$  și  $I_{MPP} = 0.47A$ , având 32 de celule înseriate.

Pentru fiecare panou am folosit câte o caracteristică  $I(V)$  pe baza căreia am estimat cu diferite metode parametrii panoului. Concluziile rezultate au fost ulterior validate folosind alte caracteristici ale panourilor.

#### 2.7.1. Rezultate obținute pentru M-2D

Estimarea parametrilor pentru M-2D s-a realizat cu ajutorul metodei bazate pe algoritmi genetici EP-AG prezentată în paragraful 2.6.1., denumită în continuare EP-AG-2D.

- Parametrii de inițializare a aplicației au fost:
  - $N_{max} = 100$  (sau 500 atunci când după primele 100 de generații nu s-au obținut rezultate satisfăcătoare),
  - $\alpha = 10$ ,
  - $\beta = 8$ ,

- $\gamma=2$ ,
  - $j=12$ ,
  - $q=20$ ,
  - $p=\pm 10\%$ ,
  - $Z_{pi}=\pm 25\%$ ,
  - $Z_{pm}=\pm 40\%$ .
- Caracteristicile externe  $I(V)$  determinate experimental (memorate prin vectorii  $V_{k\_mas}$ ,  $I_{k\_mas}$ ) corespund Tabelului 2.7-1.

**Tabelul 2.7-1:** Vectorii  $V_{k\_mas}$ ,  $I_{k\_mas}$  corespunzători caracteristicilor experimentale.

Panou	ind.k vec.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		PV_P <sub>1</sub>	$V_{k\_mas}$	0	2	4	6	7	8	9	9.5	10	10.5
$I_{k\_mas}$	0.45		0.44	0.426	0.407	0.396	0.385	0.354	0.318	0.26	0.181	0.081	0.001
PV_P <sub>2</sub>	$V_{k\_mas}$	0	20	35	50	60	65	70	75	80	85	90	95
	$I_{k\_mas}$	0.599	0.593	0.583	0.56	0.53	0.50	0.45	0.40	0.33	0.25	0.16	0.001

- Generarea individului inițial s-a făcut prin inițializarea celor 7 parametrii cu valori pentru  $I_{ph}$ ,  $I_{01}$ ,  $I_{02}$ ,  $R_p$ ,  $R_s$ ,  $V_{T1}$ ,  $V_{T2}$ : i) pentru PV\_P<sub>1</sub>:  $I_{ph}=0.452$  A,  $I_{01}=125 \cdot 10^{-12}$ ,  $I_{02}=25 \cdot 10^{-9}$ ,  $R_p=1066.8$   $\Omega$ ,  $R_s=2$   $\Omega$ ,  $V_{T1}=0.514$  V,  $V_{T2}=1.028$  V, ii) pentru PV\_P<sub>2</sub>:  $I_{ph}=0.608$  A,  $I_{01}=50 \cdot 10^{-12}$ ,  $I_{02}=10 \cdot 10^{-9}$ ,  $R_p=1382.5$   $\Omega$ ,  $R_s=20$   $\Omega$ ,  $V_{T1}=4.112$  V,  $V_{T2}=8.224$  V.

Parametrii obținuți pentru PV\_P<sub>1</sub> respectiv PV\_P<sub>2</sub> folosind EP-AG-2D cu cele 3 funcții obiectiv (GA1, GA2, GA3) sunt prezentați în Tabelul 2.7-2.

**Tabelul 2.7-2:** Parametrii estimați pentru M-2D utilizând algoritmi genetici.

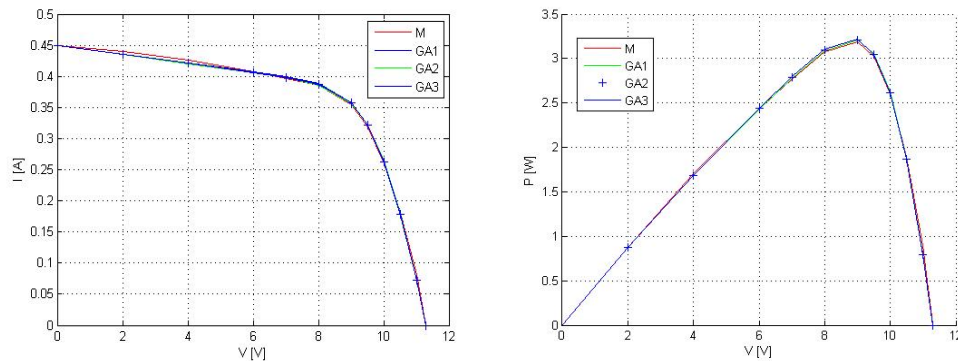
Param.	PV_P <sub>1</sub>			PV_P <sub>2</sub>		
	GA1	GA2	GA3	GA1	GA2	GA3
$I_{01} \cdot 10^{-12}$ [A]	138.844	128.898	138.148	50.5767	29.0230	64.9872
$I_{02} \cdot 10^{-9}$ [A]	25.9237	23.8655	25.1818	12.7854	13.7163	9.9752
$R_s$ [ $\Omega$ ]	2.5899	2.6497	2.6455	32.4914	29.7133	27.9561
$R_p$ [ $\Omega$ ]	131.925	134.225	139.074	1349.5	1191.7	985.09
$I_{ph} \cdot 10^{-3}$ [A]	458.834	458.883	458.560	613.421	613.935	615.999
$V_{T1} \cdot 10^{-3}$ [V]	520.637	518.815	521.044	4.2222	7.6615	4.8827
$V_{T2} \cdot 10^{-3}$ [V]	972.032	945.139	849.464	5.6666	5.4355	5.3574
fit. $10^{-3}$	14.0691	14.1314	127.128	61.0838	55.5339	4.1069
NG	100	100	100	500	500	500

Unul din obiectivele urmărite în modelarea matematică a dispozitivelor fotovoltaice fiind și determinarea MPP, pe lângă caracteristicile  $I(V)$  am determinat și caracteristicile  $P(V)$  corespunzătoare celor două panouri. De asemenea, pentru a putea realiza o analiză calitativă vizuală am introdus în Fig. 2.7-1 pentru PV\_P<sub>1</sub>, respectiv Fig. 2.7-2 pentru PV\_P<sub>2</sub>, pe lângă caracteristicile măsurate și caracteristicile corespunzătoare parametrilor determinați.

În figurile următoare am reprezentat:

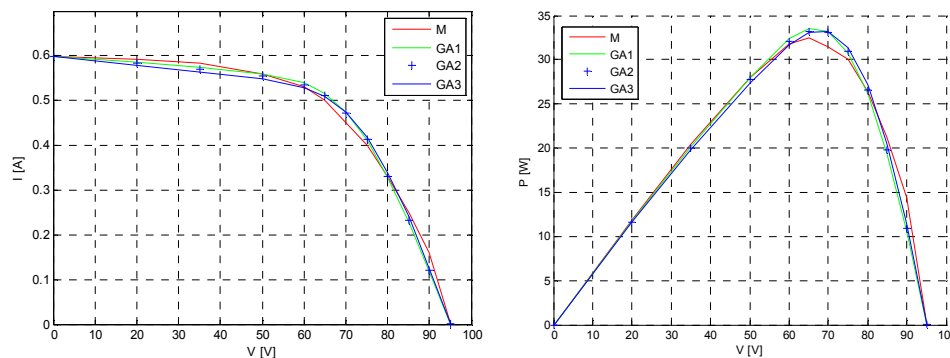
- cu *roșu* caracteristica măsurată,
- cu *albastru* caracteristica corespunzătoare parametrilor determinați folosind algoritmi genetici cu funcția fitness GA1

- cu „+” caracteristica corespunzătoare parametrilor determinați folosind algoritmi genetici cu funcția fitness GA2
- cu *albastru* caracteristica corespunzătoare parametrilor determinați folosind algoritmi genetici cu funcția fitness GA3
- cu *mov* caracteristica corespunzătoare parametrilor determinați folosind folosind funcția Mathcad *minerr()*.

Fig. 2.7-1  $I(V)$ ,  $P(V)$  : PV\_P1-EP-AG-2D-GA1, PV\_P1-EP-AG-2D-GA2, PV\_P1-EP-AG-2D-GA3

Analizând Fig. 2.7-1 se observă că:

- indiferent de fitness se obțin rezultate foarte bune;
- apar diferențe mici între grafice în zona 2-6 V.

Fig.2.7-2.  $I(V)$ ,  $P(V)$  : PV\_P2-EP-AG-2D-GA1, PV\_P2-EP-AG-2D-GA2, PV\_P2-EP-AG-2D-GA3

De data aceasta, cu privire la Fig. 2.7-2 vom reține că:

- toate fitness-urile sunt la fel de performante
- apar diferențe mici între experiment și calcul în toate zonele.

### 2.7.2. Rezultate obținute pentru M-E1

Estimarea parametrilor pentru M-E1 s-a realizat atât cu metoda bazată pe algoritmi genetici (EP-AG-E1) cât și cu metoda bazată pe minimizarea erorii cu

ajutorul funcției Mathcad  $minerr(b, R_{Se})$  notată în continuare cu EP-Math-E1. (v. paragraful 2.6.3.).

Pentru EP-AG-E1 au fost făcute următoarele particularizări ale metodei generice prezentate în paragraful 2.6.1:

- *Parametrii de inițializare a aplicației* au fost:
  - $N_{max}=100$  (sau 500 atunci când după primele 100 de generații nu obținut rezultate satisfăcătoare),
  - $a=10$ ,
  - $\beta=8$ ,
  - $\gamma=2$ ,
  - $j=15$ ,
  - $q=20$ ,
  - $p=\pm 10\%$ ,
  - $Z_{pi}=\pm 25\%$ ,
  - $Z_{pm}=\pm 40\%$ .
- *Caracteristicile externe  $I(V)$  determinate experimental* (memorate prin vectorii  $V_{k\_mas}$ ,  $I_{k\_mas}$ ) corespund Tabelului 2.7-1.
- *Generarea individului inițial* s-a făcut prin inițializarea celor 2 parametri cu valori pentru  $I_{sat}$ ,  $R_{Se}$ . Aceste valori au fost pentru PV\_P1:  $I_{sat}=10^{-9}A$ ,  $R_{Se}=1\Omega$ , iar pentru PV\_P2:  $I_{sat}=10^{-9}A$ ,  $R_{Se}=20\Omega$ .
- Parametrii obținuți pentru PV\_P1 respectiv PV\_P2 folosind EP-AG-E1 cu cele 3 funcții obiectiv (GA1, GA2, GA3) respectiv EP-Math-E1 cu funcția de minimizare a erorii  $minerr()$ , sunt prezentate în Tabelul 2.7-3.

**Tabelul 2.7-3:** Parametrii identificați pentru M-E1

Param.	PV_P1				PV_P2			
	GA1	GA2	GA3	Math-E1	GA1	GA2	GA3	Math-E1
$I_{sat}\cdot 10^{-6}$ [A]	406.9	407.4	407.7	3415.2	38.53	24.58	41.51	934.5
$R_{Se}\cdot 10^{-6}$ [ $\Omega$ ]	8.503	11.33	9.721	0.739	35.62	34.85	34.99	10.30
fit. $\cdot 10^{-3}$	55.04	55.04	368.4	-	92.56	94.46	80.97	-
NG	500	500	500	-	100	100	100	-

Caracteristicile  $I(V)$  și  $P(V)$  corespunzătoare parametrilor din Tabelul 2.7-3 au aspectul din Fig. 2.7-3 pentru PV\_P1, respectiv Fig. 2.7-4 pentru PV\_P2.

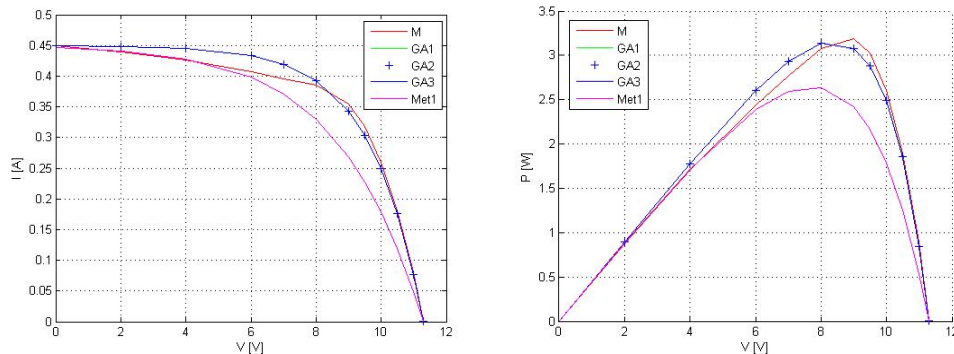


Fig. 2.7-3.  $I(V)$ ,  $P(V)$  : PV\_P1-EP-AG-E1-GA1, PV\_P1-EP-AG-E1-GA2, PV\_P1-EP-AG-E1-GA3, PV\_P1-EP-Math-E1



În primul caz se constată că:

- modelul bazat pe algoritmi genetici conduce indiferent de fitness la rezultate apropiate de caracteristica măsurată începând cu zona cotului până la regimul de mers în gol.
- modelul bazat pe metoda grafo-analitică conduce la aproximări bune în zona curenților mari și în apropiere de regimul de mers în gol. În zona cotului erorile sunt mari.

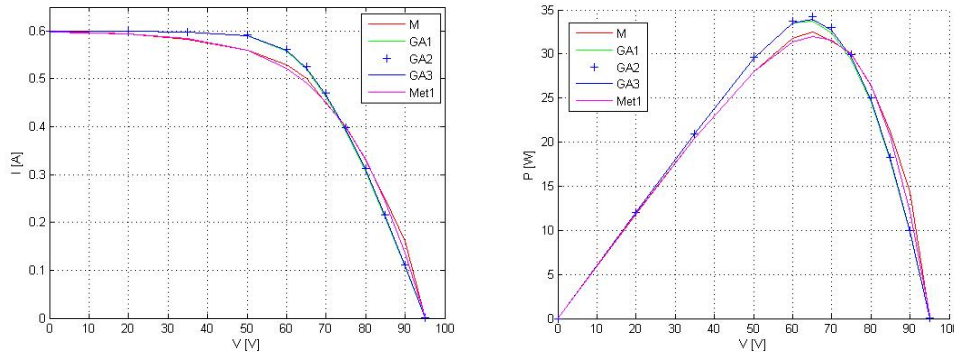


Fig. 2.7-4.  $I(V)$ ,  $P(V)$  : PV\_P2-EP-AG-E1-GA1, PV\_P2-EP-AG-E1-GA2, PV\_P2-EP-AG-E1-GA3, PV\_P2-EP-Math-E1

Pentru cel de al doilea caz se constată că:

- metodele bazate pe algoritmi genetici furnizează erori mari mai ales în zona cotului
- metoda bazată pe minimizarea erorii cu ajutorul funcției  $minerr(k_e)$  conduce la rezultate foarte apropiate de experiment.

### 2.7.3. Rezultate obținute pentru M-E3

Pentru identificarea parametrilor M-E3 s-a utilizat o metodă de estimare a parametrilor bazată pe algoritmi genetici, EP-AG-E3, și o metodă de estimare a parametrilor bazată pe minimizarea erorii folosind funcția Mathcad  $minerr(k_e)$ , metodă notată în continuare cu EP-Math-E3. Metodele sunt detaliate în paragraful 2.6.4.

Pentru EP-AG-E3 au fost făcute următoarele particularizări:

- Parametrii de inițializare a aplicației au fost:
  - $N_{max}=50$ ,
  - $a=10$ ,  $\beta=8$
  - $\gamma=2$ ,
  - $j=15$ ,
  - $q=20$ ,  $p=\pm 10\%$ ,
  - $Z_{pi}=\pm 25\%$ ,  $Z_{pm}=\pm 40\%$ .
- Caracteristicile externe  $I(V)$  determinate experimental (memorate prin vectorii  $V_{k\_mas}$ ,  $I_{k\_mas}$ ) corespund Tabelului 2.7-1
- Generarea individului inițial s-a făcut prin inițializarea parametrului  $k$ . Valoarea acestui parametru a fost pentru PV\_P1:  $k=10$ , iar pentru PV\_P2:  $k=5$ .

Parametrii obținuți sunt prezentați în Tabelul 2.7-4, iar caracteristicile  $I(V)$  și  $P(V)$  corespunzătoare în Fig. 2.7-5 pentru PV\_P<sub>1</sub> și Fig. 2.7-6 pentru PV\_P<sub>2</sub>.

**Tabelul 2.7-4:** Parametrii determinați pentru ME-3

PV_P / f Param.	PV P <sub>1</sub>				PV P <sub>2</sub>			
	GA1	GA2	GA3	GAM2	GA1	GA2	GA3	GAM2
$k_e$	7.0537	6.6427	6.6416	6.723	4.66948	4.6785	4.6381	4.647
fit	0.0651	0.0623	0.0623	-	0.0316	0.0176	2.8980	-
NG	50	50	50	-	50	50	50	-

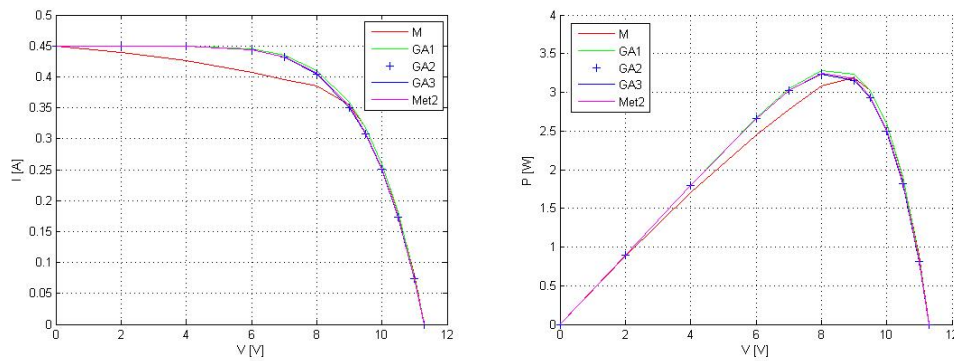


Fig. 2.7-5.  $I(V)$ ,  $P(V)$  : PV\_P<sub>1</sub>-EP-AG-E3-GA1, PV\_P<sub>1</sub>-EP-AG-E3-GA2, PV\_P<sub>1</sub>-EP-AG-E3-GA3, PV\_P<sub>1</sub>-EP-Math-E3

În cazul PV\_P<sub>1</sub> se constată că:

- toate metodele conduc la rezultate care diferă de experiment la curenți mari decât cei corespunzători MPP (până în zona cotului).

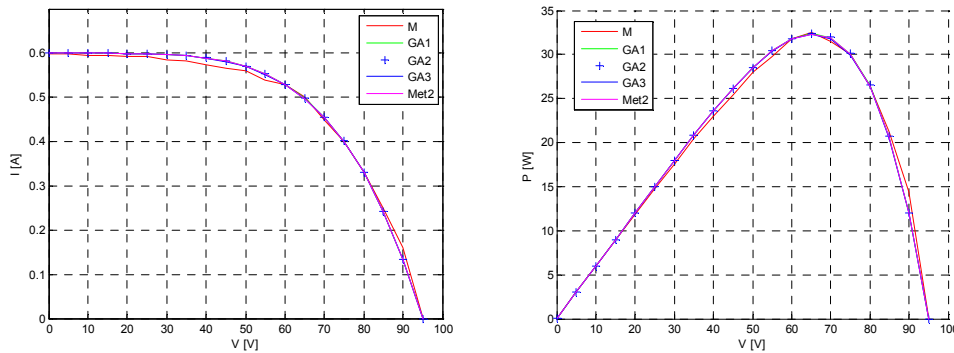


Fig.2.7-6.  $I(V)$ ,  $P(V)$  : PV\_P<sub>2</sub>-EP-AG-E3-GA1, PV\_P<sub>2</sub>-EP-AG-E3-GA2, PV\_P<sub>2</sub>-EP-AG-E3-GA3, PV\_P<sub>2</sub>-EP-Math-E3

Se observă că această concluzie este valabilă și în cazul PV\_P<sub>2</sub>.

#### 2.7.4. Sinteza rezultatelor obținute

Rezultatele obținute în paragrafele anterioare sunt sistematizate în Tabelul 2.7-5. Diferențele dintre caracteristicile măsurate și caracteristicile obținute sunt notate cu:

- c - pentru o aproximare foarte bună;
- (●) - pentru diferențe minore;
- (+) - pentru diferențe mici;
- (++) - pentru diferențe medii.

Intervalul în care apar diferențele este notat cu 20 – 50%, intervalul echivalent fiind  $[0.2 \cdot V_{oc}, 0.5 \cdot V_{oc}]$ .

**Tabelul 2.7-5:** Sinteza rezultatelor obținute

Modele Metode	Panoul utilizat	M-2D	M-E1	M-E3
EP-AG-	PV_P <sub>1</sub>	(●) 20 – 30%	(++) 20 – 50%; (+) 60 – 70%	(++) 0 – 80%
	PV_P <sub>2</sub>	(●) 0 – 100%	(+) 30 – 100%	c
EP-Math-	PV_P <sub>1</sub>		(+) 50 – 90%	
	PV_P <sub>2</sub>		c	
EP-Math-	PV_P <sub>1</sub>			(++) 0 – 80%
	PV_P <sub>2</sub>			c

## 3. EMULATOR DE PANOURI FOTOVOLTAICE

### 3.1. Problematika emulării panourilor fotovoltaice

Emularea unui panou fotovoltaic este utilă pentru dezvoltarea de aplicații de utilizare a panourilor, permițând testarea diferitelor variante de cuplare a panourilor la sarcină prin grupuri de conversie (v. Fig. 1.4-2) comandate în buclă închisă sau deschisă după diferite strategii de conducere, cum sunt, bunăoară, cele de tip extremal (MPP). Utilizarea emulatoarelor are avantajul substituirii ansamblului alcătuit din panoul fotovoltaic și sursa solară, necontrolabilă și dependentă de condițiile de mediu.

Emulatoarele au drept funcție substituirea unui ansamblu real panou fotovoltaic-sursă solară, și ca urmare trebuie să genereze cu o precizie rezonabilă, în procesul de emulare hardware și/sau software, caracteristicile  $I(V)$  ale panoului real. Acest lucru se obține imprimând emulatorului, de o manieră adecvată, modelul panoului substituit alcătuit din familia de caracteristici externe  $I(V)$  de parametri  $G$  (radiația solară) și  $\theta$  (temperatura mediului ambiant). În procesele de emulare cele două mărimi apar ca mărimi de intrare ale emulatorului.

Problematika emulatoarelor de panouri fotovoltaice apare în literatura de specialitate începând cu anul 2003. Toate abordările identificate în literatură adoptă tacit sau neriguros ideea că modelele celulelor fotovoltaice sunt utilizabile și pentru panourile obținute prin diferite moduri de interconectare a celulelor (v. partea finală a paragrafului 1.2).

În ceea ce privește tipul modelelor utilizate în lucrările referitoare la emulatoarele de panouri fotovoltaice reținem că:

- În [Sera 2006], [Sera 2008a], [Valentini 2008], [2009 Koutroulis] se folosește, din considerente de simplificare a calculelor, modelul cu o diodă (M-1D), model prezentat în teză în paragraful 2.2.1 (Fig. 2.2-2 respectiv rel. (2.2-5)).
- În [Dolan 2010], [Lee 2011] se utilizează modelul cu o diodă extins (M-1De), model prezentat în teză în paragraful 2.2.2 (Fig. 2.2-4 respectiv rel. (2.2-10)), iar în [Cirrincione 2008], [Piazza 2010] o variantă simplificată a acestuia (M-1De-s), bazată pe renunțarea la rezistența  $R_p$ , ceea ce conduce

la o caracteristică externă de forma 
$$I = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_T}} - 1 \right).$$

Spre deosebire de soluțiile de mai sus, varianta propusă în acest capitol folosește modelul cu 2 diode (M-2D), prezentat în teză în paragraful 2.2.3 (Fig. 2.2-5 respectiv rel. (2.2-15)).

Pentru realizarea fizică a emulatorului de panouri fotovoltaice (E\_PV\_P), autorii menționați recurg la 3 tipuri de abordări<sup>2</sup> (nici una dintre prezentările din literatură nu permite reproducerea soluțiilor):

- *Utilizarea unei surse de tensiune de curent continuu împreună cu un convertor DC-DC controlate printr-un sistem de reglare conform schemei de principiu din Fig. 3.1-1. Această tip de realizare apare în lucrările [Cirrincione 2008], [Piazza 2010], [Dolan 2010], [Koutroulis 2009].*

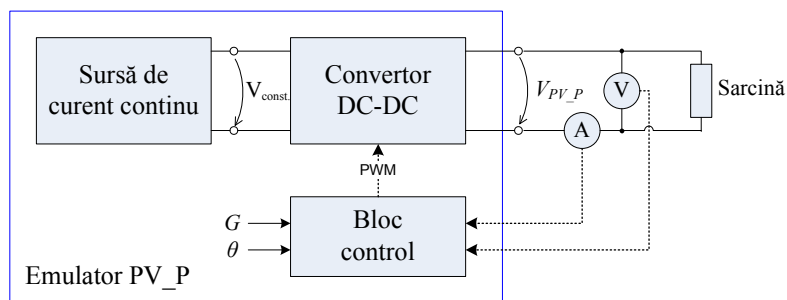


Fig. 3.1-1. Schema de principiu pentru E\_PV\_P-convertor DC-DC

Sursa de curent continuu este un generator de tensiune constantă cu limitare de curent, valoarea limitării fiind setată la o valoare mai mare decât valoarea curentului de scurt circuit al PV\_P.

Convertorul DC-DC este comandat cu ajutorul unui semnal PWM în funcție de curentul și/sau tensiunea obținute la ieșirea emulatorului precum și de  $G$  și  $\theta$ . Blocul de control implementează modelul de panou selectat cu rol de element de referință, iar pe de altă parte un algoritm de reglare a curentului de la panou. Este de dorit ca punctul de funcționare obținut să fie cât mai aproape de punctul de funcționare teoretic obținut prin modelare.

Folosirea unui convertor DC-DC are avantajul unui timp de răspuns mic al E\_PV\_P la modificări ale valorilor parametrilor  $G$  și  $\theta$  sau a sarcinii  $R_L$  [Dolan 2010]. În [Dolan 2010] soluția este analizată doar prin simulare, rezultând la modificarea  $R_L$  un timp de răspuns în jur de 15 ms. Pentru o realizare fizică a E\_PV\_P, [Cirrincione 2008] a obținut în funcție de mărimile modificate și valoarea variației acestora, un timp de răspuns între 1,5 și 3 secunde.

În ceea ce privește eroarea curentului emulat,

$$\varepsilon_I = \frac{|I_{PV\_P} - I_{E\_PV\_P}|}{I_{PV\_P}} \cdot 100, \text{ în care } I_{PV\_P} \text{ este curentul de la ieșirea PV\_P}$$

$I_{E\_PV\_P}$  iar este curentul de la ieșirea emulatorului, rezultatele relatate sunt:  $\varepsilon_I < 5\%$  în [Cirrincione 2008] și [Koutroulis, 2009], respectiv  $\varepsilon_I < 20\%$  în [Piazza 2010].

- *Utilizarea unui convertor DC-DC cu rezistor variabil comandat.* Principiul este diferit de cel din cazul anterior prin faptul că în circuitul convertorului se

<sup>2</sup> În schemele bloc din acest capitol, conexiunile informaționale sunt marcate cu linie întreruptă iar conexiunile fizice (electrice) sunt marcate linie continuă.

folosește fie un potențiomtru programabil ([Lee 2011]), fie un rezistor cu comutare intermitentă ([Lopes 2003]).

În primul caz, se utilizează schema de principiu din Fig. 3.1-2. Abaterile în curent sunt sub 5 % ( $\varepsilon_I < 5\%$ ). Totodată, în [Lee 2011] se menționează și o soluție care ține cont și unghiul de incidență a radiație solare mărind astfel precizia emulării.

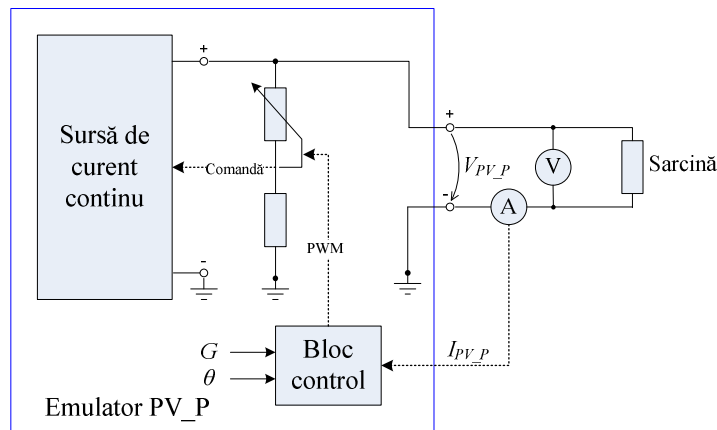


Fig. 3.1-2. O schema de E\_PV\_P- cu rezistor programabil

În [Lopes 2003] sunt prezentate doar simulări.

Tot în aceasta de a doua categorie de emulatoare se înscrie și varianta prezentată în [Mukerjee 2007]. În acest caz este folosită o schemă în care potențiomtrul programabil este conectat în serie. Datorită modului de conectare al potențiomtrului se pot face emulări doar în jurul punctului de putere maximă, fiind imposibilă atingerea punctelor  $V_{OC}$  și  $I_{SC}$ .

- *Utilizarea unei surse de tensiune de curent continuu programabilă controlată printr-un bloc de reglare.*

Această variantă de realizare fizică o utilizează grupul de cercetare de la Alborg [Sera 2006], [Sera 2008b], [Valentini 2008]. Din considerente de asigurare a puterii necesare emulatorul este prevăzut cu 2 surse de tensiune programabile Delta Electronika SM300-10DC având parametrii:  $V_{max}=300$  V și  $I_{max}=10$  A. Caracteristicile realizate de schemă corespund unui model de tip M-1D. Se emulează un panou cu parametrii:  $P_{MPP}=120$  W cu  $I_{SC}=3.87$  A și  $V_{OC}=42.1$  V. În lucrările menționate nu se precizează performanțele statice și dinamice ale emulatorului.

Schema de principiu este prezentată în Fig. 3.1-3.

Discuția anterioară este sistematizată în tabelul 3.1-1. Zona marcată cu gri corespunde dezvoltărilor și contribuțiilor din teză. Soluția prezentată este transparentă și conține, spre deosebire de restul lucrărilor și un studiu de stabilitate.

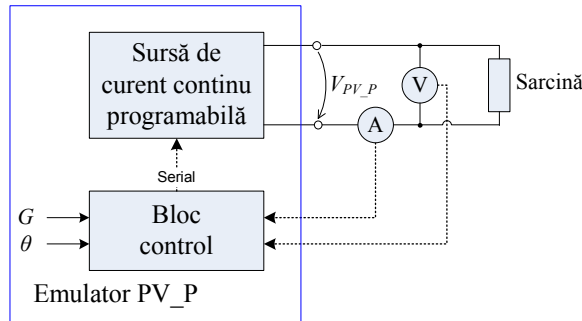


Fig. 3.1-3. Schema de principiu pentru E\_PV\_P-sursă programabilă

**Tabelul 3.1-1:** Sinteza metodelor de realizare a emulatorului.

Realizare / Model	Cu convertor DC-DC	Cu potențiomtru programabil	Cu sursă programabilă
M-1D	[2009 Koutroulis]	[Lopes 2003]	[Sera 2006] [Sera 2008b] [Valentini 2008]
M-1De	[Dolan, 2010] [Cirrincione 2008] [Piazza, 2010]	[Lee 2011]	
M-2D			[Teză, Petcuț]

### 3.2. Schema de emulator propusă și implementarea ei

#### 3.2.1. Schema și principiul de funcționare

Emularea s-a făcut cu ajutorul unei surse de tensiune programabilă de tipul Extech 32280 [Extech 32280] pentru controlul căreia s-a folosit o placă dSPACE DS1103 [DS1103]. Schema bloc este prezentată în Fig. 3.2-1. PC-ul este necesar pentru a încărca codul pe placa dSPACE și pentru a monitoriza procesul.

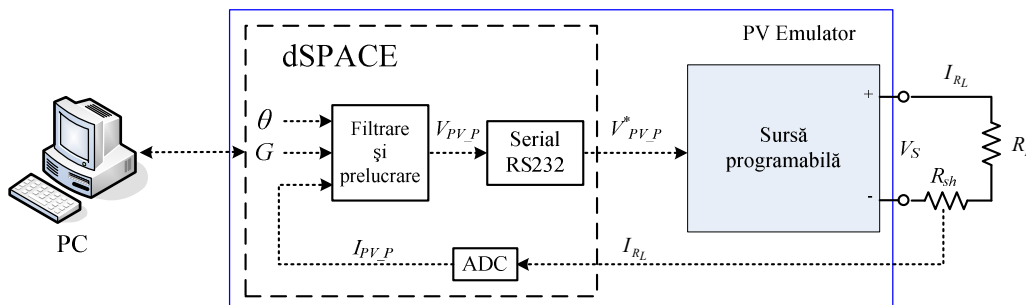


Fig. 3.2-1. Schema de principiu a emulatorului

Emulatorul este alcătuit din placa dSPACE și sursa programabilă capabilă să realizeze la borne o tensiune continuă,  $V_S$ , de până la 40 V și un curent  $I_{R_L}$ , de până la 5 A, limitabil. Comanda sursei se face pe portul serial de către placa dSPACE prin semnalul  $V_{PV\_P}^*$ . Sursa debitează pe o rezistență de sarcină  $R_L$ . Controlul sursei programabile se realizează cu ajutorul plăcii dSPACE prin reacție după curentul de sarcină  $I_{R_L}$  obținut cu ajutorul shuntului de rezistență  $R_{sh}$  și a convertorului analog-numeric ADC de pe placa dSPACE. Semnalul de reacție este filtrat și prelucrat.

Filtrarea se realizează cu un element inerțial de tip  $PT_1$  cu funcția de transfer  $H_F(s) = \frac{1}{T_R \cdot s + 1}$ . Prelucrarea constă în generarea valorii tensiunii  $V_{PV\_P}$  asociată

pe baza caracteristicii externe corespunzătoare perechii de valori  $\theta$  și  $G$  curentului  $I_{PV\_P}$  rezultat după conversie. Generarea se realizează cu ajutorul unui bloc Lookup Table care, pe de-o parte memorează prin puncte un număr fixat de caracteristici externe ale panoului emulat, iar pe de altă parte sintetizează prin interpolare puncte ale altor caracteristici externe corespunzătoare perechii de valori  $\theta$  și  $G$ . Potrivit acestor precizări schemei din Fig. 3.2-1 îi corespunde cea din Fig. 3.2-2. Se dorește ca atât curentul  $I_{R_L}$  cât și tensiunea  $V_S$ , să fie cât mai apropiate de curentul  $I_{PV\_P}$  și tensiunea panoului emulat  $V_{PV\_P}$ .

Documentația sursei [Extech 32280\_manual] prezintă doar modul de programare și modul de utilizare a acesteia, omițând aspectele referitoare la caracteristicile dinamice ale sursei (de exemplu: timpul de răspuns) și perioada minimă între două programări. După efectuare unor teste, am ajuns la concluzia că perioada minimă între două programări prin semnalul  $V_{PV\_P}$  este de 0.05 secunde. Aceasta înseamnă un semnal de comandă cu frecvență de eșantionare maximă de 20 Hz. Pentru a nu lucra la limita admisă de sursă și pentru a micșora erorile de modelare fizică am ales o perioadă de transmitere semnalului  $V_{PV\_P}$  către sursă  $h_{dS} = 0.1$  secunde, ceea ce înseamnă o frecvență de eșantionare a comenzii de 10 Hz.

Blocul Lookup Table are 3 intrări,  $\theta$ ,  $G$ ,  $I_{PV\_P}$ , și o ieșire,  $V_{PV\_P}$ , fiind capabil să genereze prin interpolare, așa cum se arată în Anexa 3.1, o familie de caracteristici externe  $V_{PV\_P}(I_{PV\_P})$  memorate prin puncte caracteristice.

În ipoteza că inerția circuitului sursei și a circuitului de sarcină se neglijează, ceea ce înseamnă efect de buclă algebrică datorită buclei de reacție, este necesară introducerea în buclă a unui element inerțial.

Filtru de ordinul I poate fi interpretat și o buclă de reglare a curentului  $I_{PV\_P}$  la valoarea  $I_{R_L}^*$  prescrisă de convertorul ADC. (Fig. 3.2-3).

Structura în buclă închisă din Fig. 3.2-2 prezintă emulatorul ca un sistem de reglare de tip special. Pentru fiecare pereche de valori ale lui  $\theta$  și  $G$  blocul Lookup Table asociază o caracteristică externă  $I_{PV\_P}(V_{PV\_P})$  distinctă. *Rolul buclei de reglare este de a regla pe această caracteristică punctul de funcționare la valorile care corespund rezistenței de sarcină  $R_L$ , adică la valorile care satisfac egalitatea*



$V_{PV\_P} = R_L \cdot I_{PV\_P}$  oricare ar fi valoarea lui  $R_L$ . Inerția procesului de reglare trebuie să fie cât mai redusă.

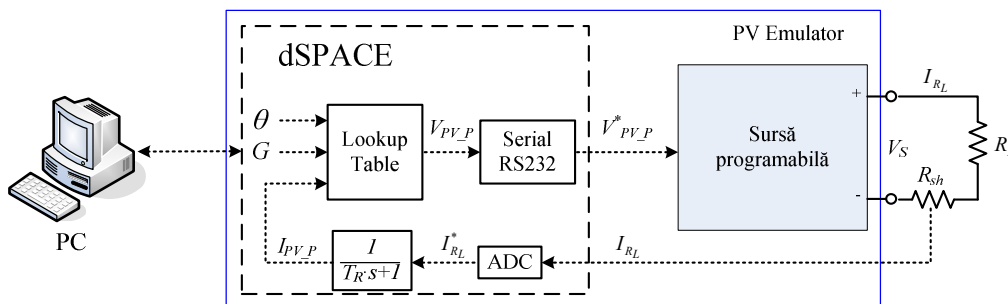


Fig. 3.2-2. Schema bloc a emulatorului - varianta cu filtrarea curentului măsurat

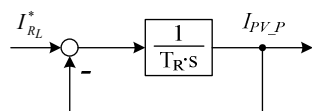


Fig. 3.2-3. Schema bloc a filtrului curentului măsurat

În paragrafele următoare se arată modul în care bucla realizează această cerință. În acest scop se procedează la modelarea ei, iar apoi la studiul stabilității emulatorului.

### 3.2.2. Modelarea ansamblului generator programabil - sarcină

În raport cu modul de utilizare sursa programabilă EXTECH 382280 este un black-box a cărui schemă electrică nu se cunoaște. Se cunosc doar: i) valorile maxim admisibile ale curentului și tensiunii la borne, respectiv ii) faptul că pe intrarea serială comenzile de pot aplica la intervale de timp  $h_{dS} \geq 0.1$  secunde.

În acest context s-a impus modelarea matematică a sursei și identificarea parametrilor modelului, Ca schemă de lucru s-a considerat structura din Fig. 3.2-4. În paralel cu rezistența de sarcină  $R_L$  este legat un divizor de tensiune format din rezistențele  $R_1$  și  $R_2$ , astfel determinate încât sarcina suplimentară introdusă să fie neglijabilă în raport cu cea reprezentată de  $R_L$  ( $R_1 + R_2 \gg R_L$ ). Prin intermediul shuntului  $R_{sh}$  și a rezistorului de rezistență  $R_2$  se măsoară curentul și tensiunea de pe sarcină,  $I_{R_L}$  și  $V_{R_L}$ .

Schema din figură este o structură în buclă deschisă comandată cu un semnal rampă cu panta de 1 V/secundă. generat de modulul dSPACE și discretizat cu pasul  $h_{dS}$ . Scenariile de experimentare considerate au constat în determinarea răspunsului sistemului,  $I_{R_L}(t)$  și  $V_{R_L}(t)$ , pentru diferite valori ale rezistenței  $R_L$  și ale pasului de discretizare  $h_{dS}$ . În acest capitol sunt prezentate doar graficele obținute în urma experimentelor pentru cazul în care  $R_L = const.$ , modificând doar  $h_{dS}$ . S-a considerat  $h_{dS} \in \{1, 3, 5\}$  secunde. Cazurile în care modificăm  $R_L$  pentru

$h_{dS}$  - constant, sunt prezentate în Anexa 3.3. Datorită limitării domeniului de tensiune de la intrarea convertorului de pe placa dSPACE la intervalul  $[-10V, 10V]$  și a necesității citirii unor tensiuni din domeniul  $[0V, 23V]$ , s-a utilizat un divizor definit de  $R_1 = 24.9 \text{ K}\Omega$  și  $R_2 = 4.87 \text{ K}\Omega$ .

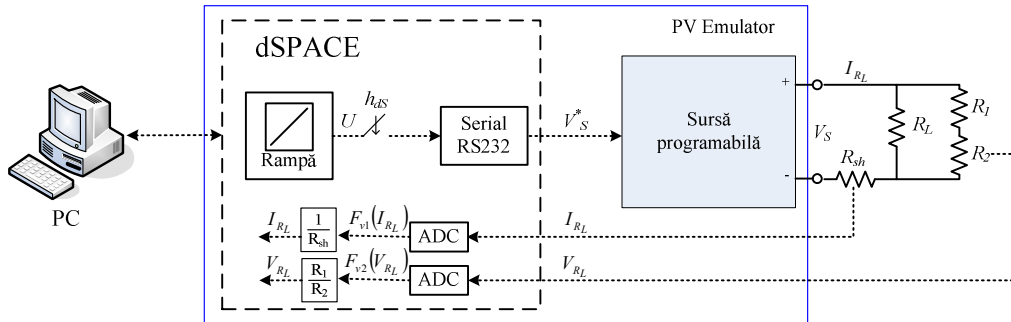


Fig. 3.2-4. Schema de principiu pentru identificarea ansamblului sursă programabilă – sarcină

Sursa programabilă este comandată prin semnal serial. În interpretare analogică, semnalului de comandă îi corespunde un semnal scară care rezultă prin aplicarea la intrarea unui element de reținere a impulsurilor provenite prin eșantionarea semnalului  $U$ . Conceptual, în implementare Simulink acest semnal se poate obține legând direct elementul de reținere la semnalul  $U$  și setând perioada de eșantionare la valoarea  $h_{dS}$ . În acest context se poate considera că în Fig. 3.2-4 semnalul  $V_S^*$  corespunde tocmai acestui semnal scară.

Schema din Fig. 3.2-4 s-a implementat practic sub forma din Fig. 3.2-5.

Blocurile utilizate în schema Simulink sunt următoarele:

- *Serial Setup* - setează comunicarea serială în conformitate cu protocolul de comunicare al sursei [sursă\_manual]. (Setările aferente sunt: *Baud rate* 9600, *Parity* none, *Data bits* 8, *Stop bits* 1, *Flow control* none).
- *Trasf\_în\_șir* - convertește valoarea tensiunii transmise sursei în șirul de caractere necesar comenzii sursei. (De exemplu, pentru valoarea tensiunii de 3,45 V, șirul trimis va fi: "V 03.450 <cr>", unde "V" este codul pentru programarea tensiunii iar "<cr>" - (Carriage Return) este codul pentru finalizarea comenzii. În locul "<cr>" se poate utiliza codul ASCII corespunzător "<cr>" respectiv valoarea 13).
- *Convert* - modifică reprezentarea numărului din double pe 8 biți în unsigned integer pe 8 biți.
- *Limitare* - realizează o limitare a tensiunii de la bornele sursei în domeniul  $[0V, 25V]$  pentru a evita programarea sursei cu valori din afara acestui domeniu.
- *Adapt\_tens* - este folosit pentru a converti numărul obținut în urma citirii tensiunii de pe  $R_2$  la nivelul real al tensiunii de pe sarcina  $R_L$ . Aceasta se face prin înmulțirea cu  $10 \cdot \frac{R_1}{R_2}$ , 10 datorită plăcii dSPACE și  $R_1/R_2$  datorită adaptorului de nivel de tensiune.
- *Eșantionator* - realizează eșantionarea semnalelor cu pasul de eșantionare  $h_{dS}$ .



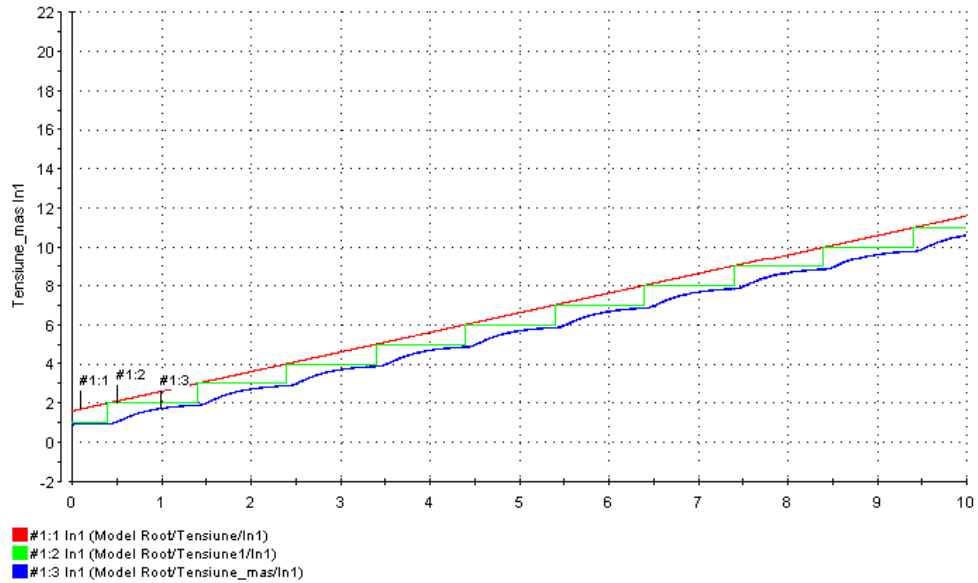
**Experiment 1:**  $h_{dS} = 1$  secundă  $R_L \sim 8 \Omega$ 

Fig. 3.2-6. Înregistrări ale semnalelor  $U$ ,  $V_S^*$ ,  $V_S$  în cazul discretizării semnalului cu pasul de 1 secundă ( $h_{dS} = 1$  secundă)

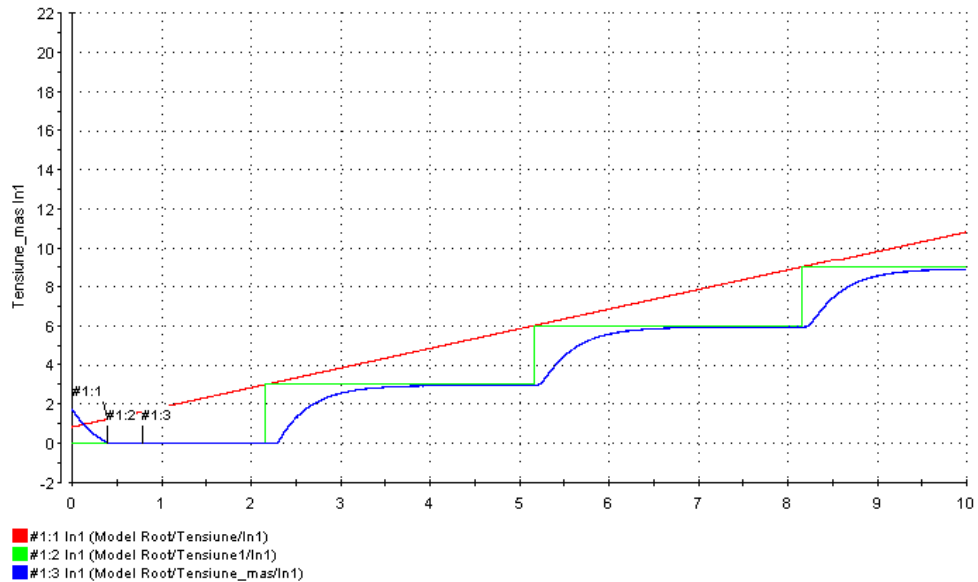
**Experiment 2:**  $h_{dS} = 3$  secunde,  $R_L \sim 8 \Omega$ 

Fig. 3.2-7. Înregistrări ale semnalelor  $U$ ,  $V_S^*$ ,  $V_S$  în cazul discretizării semnalului cu pasul de 3 secunde ( $h_{dS} = 3$  secunde)

**Experiment 3:**  $h_{dS} = 5$  secunde,  $R_L \sim 8 \Omega$

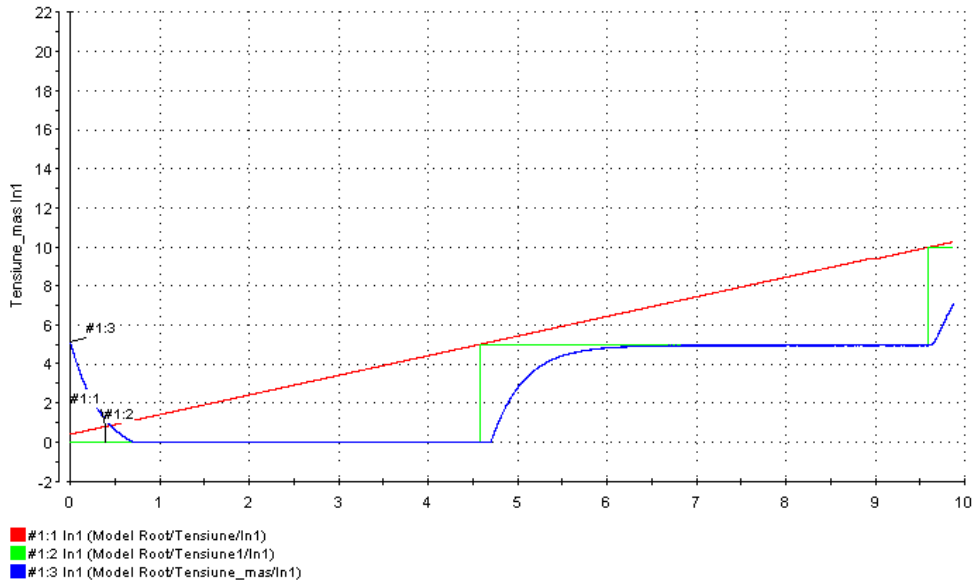


Fig. 3.2-8. Înregistrări ale semnalelor  $U$ ,  $V_S^*$ ,  $V_S$  în cazul discretizării semnalului cu pasul de 5 secunde ( $h_{dS} = 5$  secunde)

**Experiment 3 - continuare:** Diferite reluări ale experimentului 3 cu zoom-uri. Se observă ca timpul de preluare al comenzii diferă (0.05-0.12 secunde)

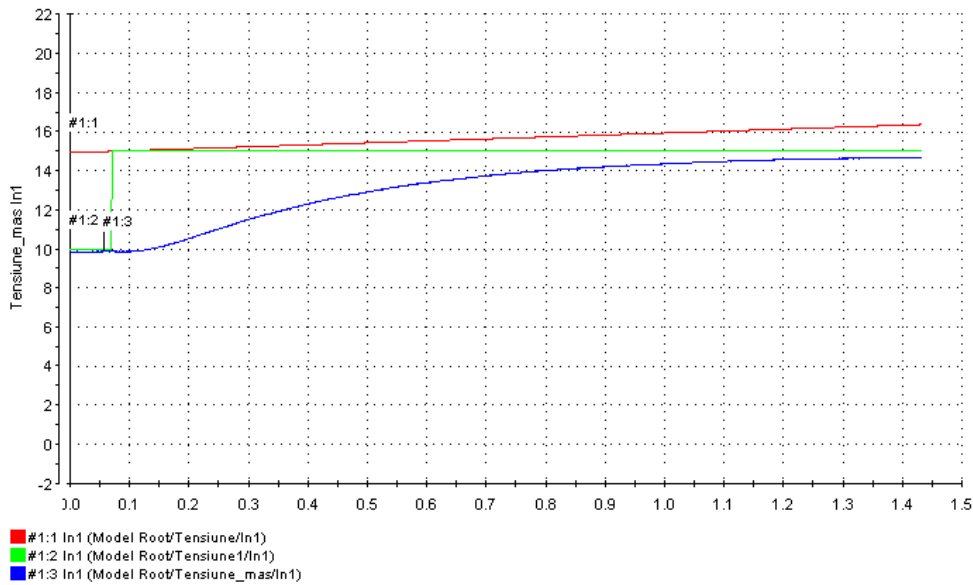


Fig. 3.2-9. Înregistrări ale semnalelor  $U$ ,  $V_S^*$ ,  $V_S$  în cazul discretizării semnalului cu pasul de 5 secunde ( $h_{dS} = 5$  secunde) - zoom

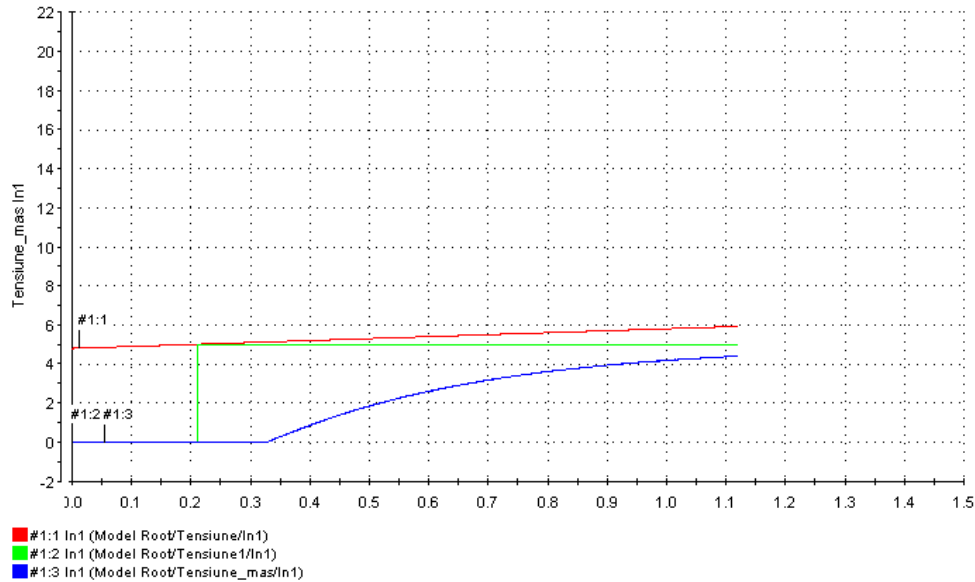


Fig. 3.2-10. Înregistrări ale semnalelor  $U$ ,  $V_S^*$ ,  $V_S$  în cazul discretizării semnalului cu pasul de 5 secunde ( $h_{dS} = 5$  secunde) - zoom

Din analiza acestor rezultate se desprind următoarele constatări:

- 1) Dependența dintre semnalele  $V_{R_L}$  și  $V_S^*$  este de tip inerțial și nu este influențată de rezistența  $R_L$ . Ea este caracterizată atât de temporizare, adică de o constantă de timp  $T_p$ , cât și de întârziere, adică de un timp mort  $\tau_p$ , fiind de forma:

$$T_p \cdot \dot{V}_S(t) + V_S(t) = V_S^*(t - \tau_p).$$

- 2) Constanta de timp  $T_p$  nu depinde de  $R_L$  și de  $h_{dS}$  fiind practic un invariant  $T_p \approx 0.5$  secunde (vezi Anexa 3.2). În cazul folosirii a două surse de tensiune programabile comandate sincron și înseriate pentru a obține emulatoare pentru panouri cu tensiuni la borne mai mari, se constată că constanta de timp se dublează (vezi Anexa 3.2 – Fig. A3.1-5).
- 3) Timpul mort  $\tau_p$  este o variabilă aleatoare a sursei programabile care ia valori din intervalul  $[0, 0.1]$  secunde. Pe această bază, într-o primă aproximație se poate considera  $\tau_p = 0$  secunde, adică să se opereze cu modelul:

$$T_p \cdot \dot{V}_S(t) + V_S(t) = V_S^*(t), \quad T_p = 0.5 \text{ secunde},$$

iar într-o a doua aproximație se poate considera  $\tau_p = 0.05$  secunde, operându-se cu modelul:

$$T_P \cdot \dot{V}_S(t) + V_S(t) = V_S^*(t - \tau_p) \quad T_P = 0.5 \text{ secunde}, \quad \tau_p = 0.05 \text{ secunde.}$$

- 4) Având în vedere că circuitul de sarcină este rezistiv și ca urmare neinerțial, în ipoteza că  $R_{sh} \ll R_L \ll R_1 + R_2$ , putem considera că:

$$V_S(t) = R_L \cdot I_{R_L}(t).$$

Ca urmare, ansamblul sursă programabilă - sarcină va fi modelat prin dependența intrare-ieșire:

$$T_P \cdot \frac{dI_{R_L}(t)}{dt} + I_{R_L}(t) = \frac{1}{R_L} \cdot V_S^*(t - \tau_p)$$

cu  $T_P = 0.5$  secunde,  $\tau_p = 0$  secunde într-o primă aproximație și  $T_P = 0.5$  secunde,  $\tau_p = 0.05$  secunde într-o a doua aproximație.

În schema din Fig. 3.2-2 rolul semnalului  $V_S^*$  îl are semnalul  $V_{PV\_P}^*$ . Mai mult, având în vedere că blocul serial RS232 transmite practic instantaneu un semnal numeric, putem considera că rolul semnalului  $V_S^*$  îl are semnalul  $V_{PV\_P}^*$ . Ca urmare vom considera ca model al circuitului generator programabil - sarcină ecuația:

$$T_P \cdot \frac{dI_{R_L}(t)}{dt} + I_{R_L}(t) = \frac{1}{R_L} \cdot V_{PV\_P}^*(t - \tau_p) \quad (3.2-1)$$

cu  $T_P = 0,5$  secunde,  $\tau_p = 0$  secunde într-o primă aproximație

și  $T_P = 0,5$  secunde,  $\tau_p = 0.05$  secunde într-o a doua aproximație.

### 3.2.3. Schema bloc informațională a emulatorului

Schema bloc informațională a emulatorului se obține plecând de la Fig. 3.2-2. În această schemă ansamblului sursă programabilă - sarcină îi corespunde modelul (3.2-1), iar blocul Lookup Table modelează caracteristica externă neliniară a unui panou fotovoltaic scrisă sub forma  $V_{PV\_P}(I_{PV\_P})$ , de parametrii  $\theta$  și  $G$ .

Totodată, din punct de vedere informațional putem considera că  $I_{R_L}^* = I_{R_L}$ . Pentru prima aproximație referită în relația (3.2-1) rezultă schema bloc din Fig. 3.2-11.

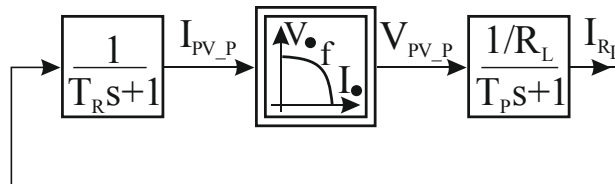


Fig. 3.2-11. Schema bloc a E\_PV\_P – varianta timp continuu

Această schemă, la fel ca și cea din Fig. 3.2-2, se referă un sistem în timp continuu. Schema implementată corespunde însă sistemului în timp discret din Fig. 3.2-12.

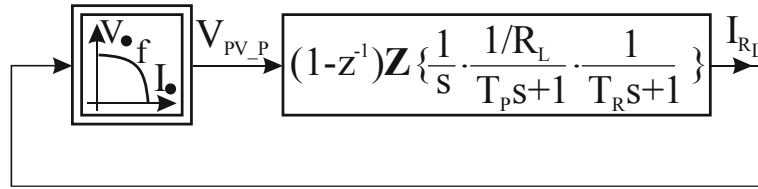


Fig. 3.2-12. Schema bloc a E\_PV\_P - varianta timp discret

Ea rezultă din cea din Fig. 3.2-11 prin discretizarea subsistemului liniar ca realizare invariantă la semnal treaptă cu pasul de discretizare  $h_{dS}$  [Dragomir, 2004]. Simbolul  $Z\{\bullet(s)\}$  indică operația de asociere a transformatei  $z$  expresiei care rezultă prin discretizarea cu pasul  $h_{dS}$  a originalului corespunzător funcției  $\bullet(s)$  dintre acolade. Discretizarea ca realizare invariantă la semnal treaptă se explică prin faptul că sursa programabilă nu admite decât comenzi discrete cu un pas de cel puțin  $h_{dS}=0.1$  secunde. În consecință, considerăm că semnalul  $I_{PV\_P}$  de comandă a sursei este transmis secvențial cu pasul  $h_{dS}$ . După cum s-a menționat în paragraful 2.2, efectul este asimilabil cu variații în formă de scară ale semnalului  $V_{PV\_P}(t)$ , ceea ce justifică modul de discretizare.

În varianta de „a doua aproximare”, schema din Fig. 3.2-12 este înlocuită prin schema din Fig. 3.2-13.

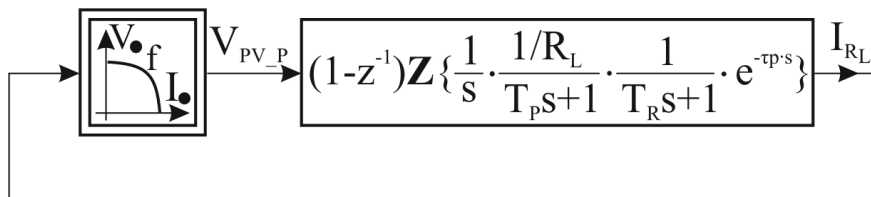


Fig. 3.2-13. Schema bloc a E\_PV\_P - varianta timp discret cu timp mort

### 3.3. Analiza stabilității emulatorului de panouri fotovoltaice (E\_PV\_P)

Pentru studiul stabilității E\_PV\_P se consideră utilă atât analiza stabilității schemei din Fig. 3.2-11 cât și a celor din Fig. 3.2-12 și Fig. 3.2-13. Schema din Fig. 3.2-11 poate fi considerată ca o situație limită, de referință, a celorlalte două în ipoteza că sursa programabilă ar admite o comandă cu un pas de discretizare infinit mic și nu ar prezenta timp mort.

În primul caz analiza stabilității se face pe baza criteriului Popov considerând un punct de funcționare oarecare, la intersecția unei caracteristici externe a PV\_P cu caracteristica rezistenței de sarcină.

În al doilea și în al treilea caz analiza stabilității se face folosind varianta generală a criteriului lui Tâpkın [Larsen 2001]. Și de data aceasta punctul de funcționare este un punct oarecare, dar, spre deosebire de cazul timp continuu, excursia sa exclude punctul de scurtcircuit al caracteristicii externe a PV\_P și o „mică” vecinătate a acestuia.



**3.3.1. Studiul stabilității absolute a E\_PV\_P**

Din punct de vedere informațional emulatorul are schema bloc din Fig. 3.2-11. în care blocul neliniar corespunde caracteristicii externe a PV\_P:  $V_{PV\_P} = f(I_{PV\_P})$ . În scopul analizei stabilității schema din Fig. 3.2-11 se reconfigurează sub forma din Fig. 3.3-1, diferența reprezentând-o utilizarea caracteristicii externe a blocului neliniar în forma

$$V_{PV\_P} = f(-(-I_{PV\_P})) = f^*(-I_{PV\_P})$$

și aplicarea la intrarea lui a mărimii  $-I_{PV\_P}$ .

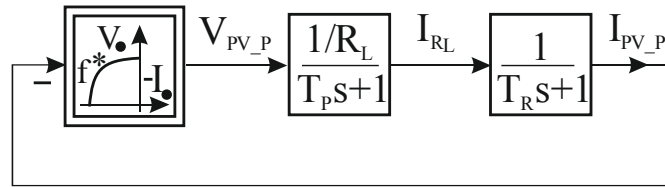


Fig. 3.3-1. Schema bloc a E\_PV\_P în timp continuu modificată

Fie  $(I_0, V_0)$  punctul de funcționare al emulatorului aflat la intersecția caracteristicii externe a PV\_P cu dreapta de sarcină, adică soluția sistemului de ecuații:

$$\begin{cases} V_{PV\_P} = R_L \cdot I_{PV\_P} \\ V_{PV\_P} = f(I_{PV\_P}) \end{cases} \quad (3.3-1)$$

Abaterile de curent și de tensiune din funcționarea curentă față de acest punct le notăm cu:

$$\Delta I = I_{PV\_P} - I_0, \Delta V = V_{PV\_P} - V_0 \quad (3.3-2)$$

Ca urmare:

$$-I_{PV\_P} = -\Delta I - I_0, -V_{PV\_P} = -\Delta V - V_0 \quad (3.3-3)$$

Înlocuind (3.3-3) în (3.3-1) obținem:

$$\Delta V + V_0 = f^*(-\Delta I - I_0)$$

sau  $\Delta V = -V_0 + f^*(-\Delta I - I_0)$ , respectiv:

$$\Delta V = f^{**}(-\Delta I),$$

unde:

$$f^{**}(-\Delta I) = -V_0 + f^*(-\Delta I - I_0) \quad .$$

Potrivit acestor relații schema bloc a emulatorului ia forma din Fig. 3.3-2:

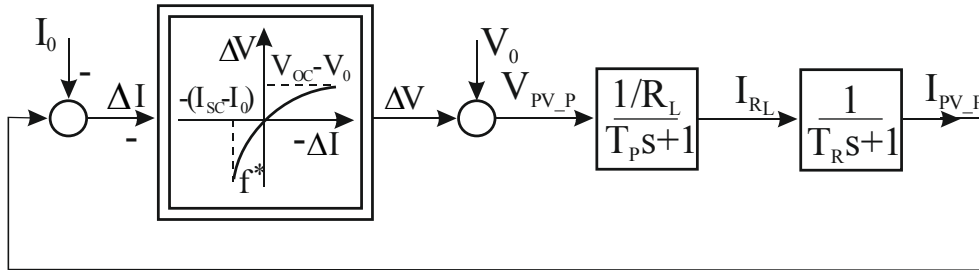


Fig. 3.3-2. Schema bloc a E\_PV\_P în timp continuu – varianta cu abateri de curent și tensiune

Din schemă rezultă pentru partea liniară MM-II:

$$T_R \cdot T_P \cdot \ddot{I}_{PV\_P}(t) + (T_R + T_P) \cdot \dot{I}_{PV\_P}(t) + I_{PV\_P}(t) = \frac{1}{R_L} \cdot V_{PV\_P}(t) \quad (3.3-4)$$

Întrucât punctul de echilibru  $I_{PV\_P} = I_0$  și  $V_{PV\_P} = V_0$  satisface ecuația (3.3-4) avem

$$I_0 = \frac{1}{R_L} V_0.$$

Totodată, folosind (3.3-2), egalitatea (3.3-4) devine:

$$T_R \cdot T_P \cdot \frac{d^2}{dt^2}(\Delta I(t) + I_0) + (T_R + T_P) \cdot \frac{d}{dt}(\Delta I(t) + I_0) + (\Delta I(t) + I_0) = \frac{1}{R_L} \cdot (\Delta V(t) + V_0)$$

Ținând seama de (3.3-4), rezultă:

$$T_R \cdot T_P \cdot \frac{d^2}{dt^2}(\Delta I(t) + I_0) + (T_R + T_P) \cdot \frac{d}{dt}(\Delta I(t) + I_0) + (\Delta I(t) + I_0) = \frac{1}{R_L} \cdot \Delta V(t)$$

În consecință problema stabilității structurii din Fig. 3.2-11 în punctul de echilibru se reduce la cea a stabilității absolute a sistemului din Fig. 3.3-3:

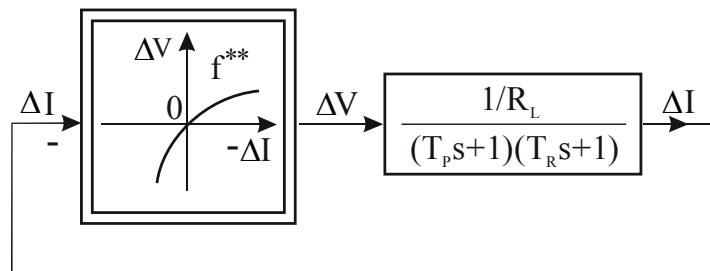


Fig. 3.3-3. Schemă bloc preliminară pentru analiza stabilității folosind criteriul Popov

Dacă notăm

$$\Delta \tilde{V} = \frac{1}{R_L} \cdot \Delta V, \quad \tilde{H}(s) = \frac{1}{(T_P \cdot s + 1) \cdot (T_R \cdot s + 1)}$$

schema ia aspectul din Fig. 3.3-4:

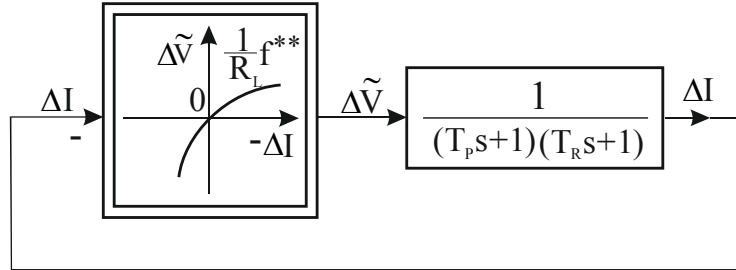


Fig. 3.3-4. Schemă bloc utilizată pentru analiza stabilității folosind criteriul Popov

Structura obținută se încadrează în cazul principal de aplicare a criteriului de stabilitate absolută al lui Popov [Föllinger 1987], [Iggidr 1996]. În vederea aplicării criteriului calculăm cantitatea

$$\operatorname{Re}\left[(1+jp\omega) \cdot \tilde{H}(j\omega)\right] = \frac{1 + (T_P + T_R) \cdot \omega^2 \cdot \left(p - \frac{T_P \cdot T_R}{T_P + T_R}\right)}{\left(1 - T_P \cdot T_R \cdot \omega^2\right)^2 + (T_P + T_R)^2 \cdot \omega^2}.$$

Se observă că pentru  $p \in \mathbb{R}, p > \frac{T_P \cdot T_R}{T_P + T_R}$  obținem:

$$\operatorname{Re}\left[(1+jp\omega) \cdot \tilde{H}(j\omega)\right] > 0, \forall \omega > 0.$$

În consecință sistemul este absolut stabil în sectorul constituit de cadranele I și III ale planului  $\langle -\Delta I \cdot 0 \cdot \Delta V \rangle$ . Prin modificarea lui  $R_L$  punctul de echilibru  $(I_0, V_0)$  se modifică iar această modificare are ca efect translatarea originii 0 a sistemului de axe  $\langle -\Delta I \cdot 0 \cdot \Delta V \rangle$  în lungul caracteristicii  $f^{**}$  (Fig. 3.3-5). Se observă că acest lucru nu afectează proprietatea de stabilitate absolută.

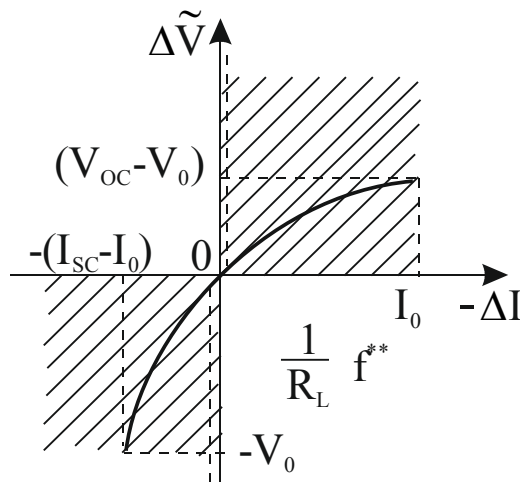


Fig. 3.3-5. Sectorul de stabilitate absolută în cazul aplicării criteriului Popov

Caracteristica externă modificată a panoului  $\Delta\tilde{V} = \frac{1}{R_L} \cdot f^{**}(-\Delta I)$  fiind inclusă în acest sector și îndeplinind condițiile criteriului Popov, rezultă ca *emulatorul este un sistem absolut stabil*.

### 3.3.2. Analiza stabilității E\_PV\_P pe baza modelului în timp discret

În această secțiune se analizează stabilitatea emulatorului atât pe baza modelului de primă aproximare (secțiunea **A**) cât și pe baza modelului de a doua aproximare (secțiunea **B**) din (3.2-1).

**A.** În cazul în care pentru ansamblul sursă programabilă – sarcină se consideră modelul (3.2-1) în varianta de primă aproximare, subsistemului în timp continuu din Fig. 3.2-11, cu orientarea  $V_{PV\_P} \rightarrow I_{PV\_P}$  îi corespunde MM-ISI

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_P} & 0 \\ \frac{1}{T_R} & -\frac{1}{T_R} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_P \cdot R_L} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [u(t)] \\ [y(t)] = [0 \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (3.3-5)$$

în care  $u$ ,  $x_1$ ,  $x_2$  și  $y$  au semnificația  $u = V_{PV\_P}$ ,  $x_1 = I_{R_L}$ ,  $x_2 = y = I_{PV\_P}$ . Realizarea invariantă la semnal treaptă a sistemului (3.3-5), echivalentă intrare-ieșire blocului în timp discret din Fig. 3.2-12, este:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_1[t+1] \\ x_2[t+1] \end{bmatrix} &= \underbrace{\begin{bmatrix} e^{-\frac{h}{T_P}} & 0 \\ \frac{T_P}{T_P - T_R} \left( e^{-\frac{h}{T_P}} - e^{-\frac{h}{T_R}} \right) & e^{-\frac{h}{T_R}} \end{bmatrix}}_{A_d} \begin{bmatrix} x_1[t] \\ x_2[t] \end{bmatrix} + \\ &+ \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{R} \left( 1 - e^{-\frac{h}{T_P}} \right) \\ \frac{1}{R} \left[ \frac{T_P}{T_P - T_R} \left( 1 - e^{-\frac{h}{T_P}} \right) - \frac{T_R}{T_P - T_R} \left( 1 - e^{-\frac{h}{T_R}} \right) \right] \end{bmatrix}}_{b_d} \cdot [u(t)] \\ [y[t]] &= [0 \quad 1] \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} x_1[t] \\ x_2[t] \end{bmatrix}}_{c_d^T} \end{aligned} \quad (3.3-6)$$

Funcția de transfer a sistemului (3.3-6), identică cu cea din Fig. 3.2-12, este:

$$H(z) = c_d^T (zI - A_d)^{-1} b_d = (1 - z^{-1}) Z \left\{ \frac{1}{s} \cdot \frac{1/R_L}{T_P s + 1} \cdot \frac{1}{T_R s + 1} \right\} = \frac{b_2 z + (a_{21} \cdot b_1 - a_{11} \cdot b_2)}{(z - a_{11})(z - a_{22})} \quad (3.3-7)$$

în care  $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, b_1, b_2$  corespund matricelor din (3.3-6)

$$A_d = \begin{bmatrix} \frac{h}{T_P} & 0 \\ \frac{1}{T_P - T_R} \cdot \left( e^{-\frac{h}{T_P}} - e^{-\frac{h}{T_R}} \right) & e^{-\frac{h}{T_R}} \end{bmatrix}, \quad B_d = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} \left( 1 - e^{-\frac{h}{T_P}} \right) \\ \frac{1}{R} \left[ \frac{T_P}{T_P - T_R} \left( 1 - e^{-\frac{h}{T_P}} \right) - \frac{T_R}{T_P - T_R} \left( 1 - e^{-\frac{h}{T_R}} \right) \right] \end{bmatrix}$$

Funcția de transfer (3.3-7) îndeplinește condițiile de aplicare ale criteriului lui Tâpkin [Larsen 2001] întrucât polii  $z_1 = a_{11}$  și  $z_2 = a_{22}$  satisfac condiția

$$\{z_1, z_2\} \in C^s,$$

unde  $C^s$  este discul de rază unitate al planului complex "z".

Pentru analiza stabilității urmărim practic aceeași pași de reconfigurare a schemei bloc a sistemului prin care s-a ajuns în paragraful anterior de la schema din Fig. 3.3-1 la schema din Fig. 3.3-2. În consecință, aplicăm criteriul lui Tâpkin schemei din Fig. 3.3-5.

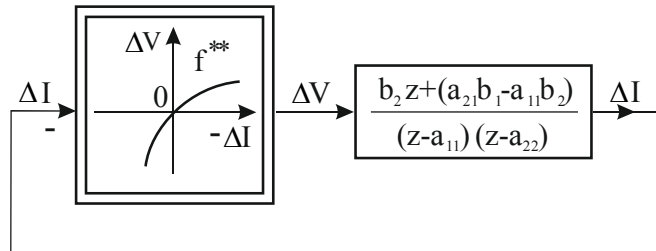


Fig. 3.3-6. Schemă bloc utilizată pentru analiza stabilității folosind criteriul Tâpkin – caz A

Locul de transfer  $H(e^{j\omega h})$  al blocului linear are aspectul din Fig. 3.3-2.

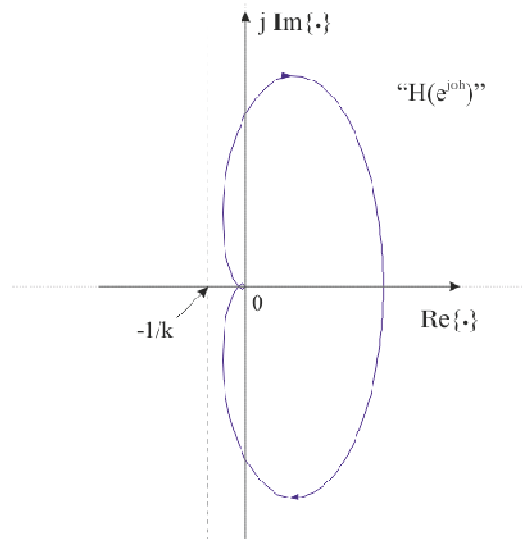


Fig. 3.3-7. Locul de transfer  $H(e^{j\omega h})$  al blocului liniar – caz A

Potrivit criteriului lui Tâpkin [Larsen 2001] structura din Fig. 3.3-6 este absolut stabilă în sectorul  $S_{[0,k]}$ , ilustrat în Fig. 3.3-8.

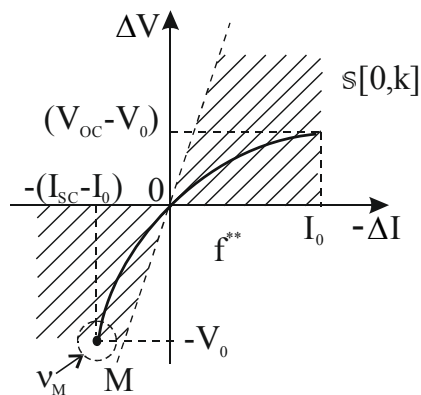


Fig. 3.3-8. Sectorul de stabilitate absolută în cazul aplicării criteriului Tâpkin

După cum s-a precizat punctul de echilibru poate lua o infinitate de poziții pe caracteristica externă. Aceasta înseamnă că în Fig. 3.3-8 caracteristica  $f^{**}$  poate ocupa diferite poziții corespunzătoare deplasării originii 0 în lungul ei. Întrucât panta caracteristicii în vecinătatea punctului  $M$ , corespunzător lui  $I = I_{SC}$ , este foarte mare, este posibil ca atunci când punctul  $O$  ajunge în vecinătatea lui caracteristica externă să iasă în exteriorul sectorului  $S_{[0,k]}$ . Deoarece din punct de vedere practic  $E_{PV\_P}$  nu funcționează în această vecinătate, restricția nu ne afectează.

Anvergura hodografului  $H(e^{j\omega h})$  depinde de parametri  $T_P$ ,  $T_R$  și  $R_L$ .

Pentru caracteristica externă de ecuație

$$I = I_{ph} - I_{01} \cdot \left( e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T1}}} - 1 \right) - I_{02} \cdot \left( e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T2}}} - 1 \right) - \frac{V+I \cdot R_S}{R_p} \quad \text{cu parametri: } V_{T1} = 1.0148 \text{ V;}$$

$V_{T2} = 1.5269 \text{ V; } I_{01} = 1.56 \cdot 10^{-9} \text{ A; } I_{02} = 346.38 \cdot 10^{-9} \text{ A; } R_S = 0.1596 \text{ } \Omega;$   
 $R_p = 58.997 \text{ } \Omega; I_{ph} = 5.0536 \text{ A,}$  s-a obținut  $k \in [k_{min}, k_{max}]$  cu  $k_{min} = 40$  și  $k_{max} = 125$ . Cu toate că domeniul ocupat de caracteristicile externe în planul ( $< V - O - I >$ ) este larg (Fig. 3.3-9), domeniul valorilor lui  $k$  este puțin influențat de parametrii  $\theta$  și  $G$  ai panoului.

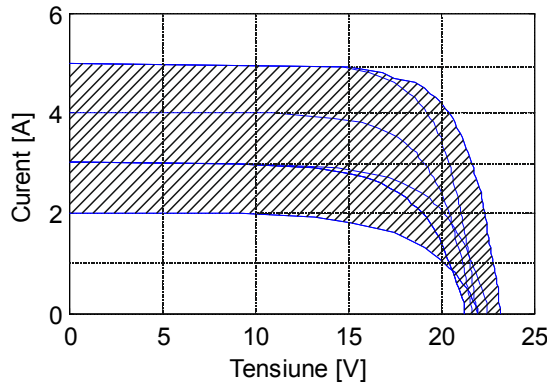


Fig. 3.3-9. Domeniul ocupat de caracteristicile externe

Ca urmare, din considerente experimentale, apreciem că o valoare  $k=50$  este acoperitoare pentru întreaga familie de caracteristici externe emulate cu ajutorul E\_PV\_P și că funcționarea E\_PV\_P este absolut stabilă în orice punct de echilibru realizabil experimental.

**B.** În cazul modelului (3.2-1) de a doua aproximație a ansamblului sursă programabilă - sarcină cu  $T_p=0.5$  secunde și  $\tau_p = 0.05$  secunde, funcția de transfer a blocului liniar este

$$H(z) = (1 - z^{-1}) \cdot Z \left\{ \frac{1}{s} \cdot \frac{1/R_L}{T_p s + 1} \cdot \frac{1}{T_{RS} + 1} \cdot e^{-\tau_p s} \right\} = (1 - z^{-1}) \cdot z^{-\gamma} \cdot Z_\rho \left\{ \frac{1}{s} \cdot \frac{1/R_L}{T_p s + 1} \cdot \frac{1}{T_{RS} + 1} \right\}$$

$Z_\rho$  reprezintă transformata  $\mathbf{z}$  modificată a expresiei dintre acolade, iar  $\gamma$  și  $\rho$  rezultă din descompunerea timpului mort  $\tau_p$  sub forma

$$\tau_p = \gamma \cdot h - \rho \cdot h, \quad \gamma \in N^*, \quad \rho \in [0, 1]. \quad (3.3-8)$$

Efectuând calculele obținem  $H(z) = \frac{1}{R_L} \cdot \frac{\beta_2 z^2 + \beta_1 z + \beta_0}{z(z - a_{11})(z - a_{22})}$  cu

$$a_{11} = e^{-\frac{h_{dS}}{T_P}}, \quad a_{22} = e^{-\frac{h_{dS}}{T_R}}, \quad (3.3-9)$$

$$\beta_2 = 1 + \frac{T_P}{T_R - T_P} a_{11}^\rho - \frac{T_R}{T_R - T_P} a_{22}^\rho$$

$$\beta_1 = a_{11} - a_{22} + \frac{T_P}{T_R - T_P} (1 + a_{22}) a_{11}^\rho - \frac{T_R}{T_R - T_P} (1 + a_{11}) a_{22}^\rho$$

$$\beta_0 = a_{11} a_{22} + \frac{T_P}{T_R - T_P} a_{11}^\rho a_{22} - \frac{T_R}{T_R - T_P} a_{11} a_{22}^\rho.$$

Întrucât  $\tau = 0.5$  secunde,  $h = h_{dS} = 0.1$  secunde din (3.3-8) rezultă  $\gamma = 1$ , respectiv  $\rho = 0.5$ . Ca urmare

$$H(z) = (1 - z^{-1}) \cdot z^{-1} \cdot Z_{0.5} \left\{ \frac{1}{s} \cdot \frac{1/R_L}{T_P s + 1} \cdot \frac{1}{T_R s + 1} \right\} = \frac{(\beta_2 / R_L) z^2 + (\beta_1 / R_L) z + (\beta_0 / R_L)}{z(z - a_{11})(z - a_{22})} \quad (3.3-10)$$

cu  $a_{11}$  și  $a_{22}$  având expresiile (3.3-9) și cu

$$\beta_2 = \frac{T_R(1 - \sqrt{a_{22}}) - T_P(1 - \sqrt{a_{11}})}{T_R - T_P},$$

$$\beta_1 = \frac{T_R(a_{11} - \sqrt{a_{22}} - a_{11} \cdot \sqrt{a_{22}}) - T_P(a_{22} - \sqrt{a_{11}} - a_{22} \cdot \sqrt{a_{11}})}{T_R - T_P},$$

$$\beta_0 = a_{11} a_{22} + \frac{T_P}{T_R - T_P} a_{22} \cdot \sqrt{a_{11}} - \frac{T_R}{T_R - T_P} a_{11} \cdot \sqrt{a_{22}}$$

Rezultă că în acest caz studiul stabilității se face pe baza expresiei (3.3.8) a lui  $H(z)$ , respectiv pe baza schemei din Fig. 3.3-10.

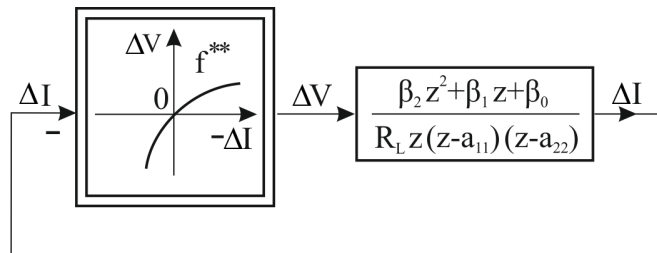


Fig. 3.3-10. Schemă bloc utilizată pentru analiza stabilității folosind criteriul Tâpkin - caz B

Pentru acest caz hodograful Nyquist al blocului liniar are aspectul din Fig. 3.3-11.



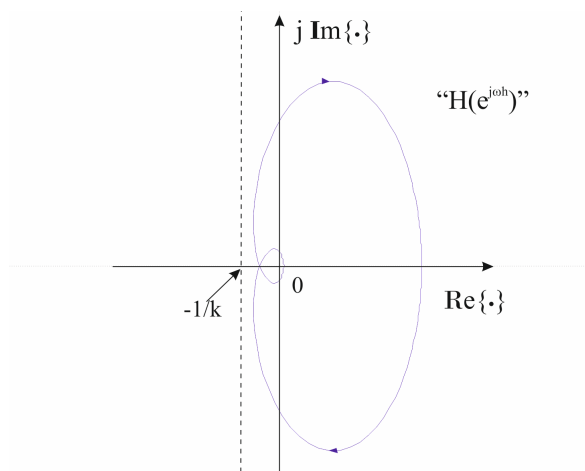


Fig. 3.3-11. Locul de transfer  $H(e^{j\omega h})$  al blocului liniar - caz B

Studiul a fost efectuat în condiții similare cu cazul **A**, și s-a obținut  $k \in [k_{min}, k_{max}]$  cu  $k_{min} = 20$  și  $k_{max} = 115$ . Întrucât valoarea  $k_{min}$  din acest caz este mai mică decât cea din cazul **A** vom considera că valoarea  $k = 25$  este practic acoperitoare pentru întreaga familie de caracteristici externe emulate cu ajutorul E\_PV\_P și că funcționarea E\_PV\_P este absolut stabilă în orice punct de echilibru realizabil experimental.

### 3.4. Studiu experimental al emulatorului de panouri fotovoltaice (E\_PV\_P)

În cadrul acestui subcapitol se procedează la validarea experimentală a emulatorului realizat potrivit schemei bloc din Fig. 3.2-2 (*schema bloc a emulatorului - varianta cu filtrarea curentului măsurat*). Pentru validare am realizat 3 categorii de experimente:

- experimente de verificare a realizării caracteristicilor externe  $I_{PV\_P}(V_{PV\_P})$ ;
- experimente privind comportarea emulatorului la variații ale radiației solare și temperaturii mediului ambiant;
- experimente privind comportarea emulatorului la variații ale rezistenței de sarcină.

Experimentele din categoria A sunt experimente de regim permanent constant și constau în verificarea realizării diferitelor puncte de funcționare de pe caracteristicile externe ale panoului emulat.

Celelalte două categorii de experimente, care vizează regimuri dinamice, diferă prin viteza de variație a semnalelor de intrare. Variațiile radiației solare și temperaturii mediului ambiant din experimentele de tip B sunt lente, decurgând pe durata mai multor minute. Pentru variațiile rezistenței de sarcină din experimentele de tip C s-a considerat cazul când acestea au loc brusc, prin scurtcircuitare, sau continuu pe durata a 1 – 2 secunde.

Așa cum au evidențiat experimentele efectuate cu ajutorul schemei din Fig. 3.2-5 sursa programabilă are două tipuri de limitări care afectează performanțele emulatorului. Astfel:

- Sursa manifestă o inerție caracterizată printr-o constantă de timp  $T_P = 0.5$  secunde și un timp mort.
- Frecvența maximă de comandă este de 10 Hz.

În acest context experimentele au urmărit:

- evidențierea stabilității emulatorului,
- capacitatea emulatorului de a emula corect caracteristicile unui panou fotovoltaic implementat prin blocul Lookup Table,
- studierea modului de adaptare a emulatorului la variațiile rezistenței de sarcină.

Datorită limitărilor menționate adaptarea la variațiile rezistenței de sarcină nu poate să fi instantanee.

După cum s-a arătat în analiza de stabilitate efectuată în secțiunea 3, sectorul de stabilitate absolută a emulatorului în planul tensiune – curent poate fi influențat (neesențial) prin intermediul parametrului  $T_R$ . În cazul considerării modelului fără timp mort domeniul de variație a fost  $[0,03125, 2]$ , iar în cazul considerării timpului mort de  $[0,03125, 0,5]$ . Având în vedere acest lucru experimentele din categoriile B și C s-au efectuat pentru mai multe valori ale parametrului  $T_R$ .

În toate experimentele s-a utilizat schema Fig. 3.4-1. Ea corespunde schemei din Fig. 3.2-2. În cadrul experimentelor a fost folosit modul dSPACE DS1103 [DS1103] și o sursă programabilă Extech 32280 [Extech 32280]. Blocul Lookup Table activat în modulul dSPACE implementează un panou fotovoltaic cu caracteristicile din Fig. 2.1-2. Maniera de implementare este discutată în Anexa 3.1.

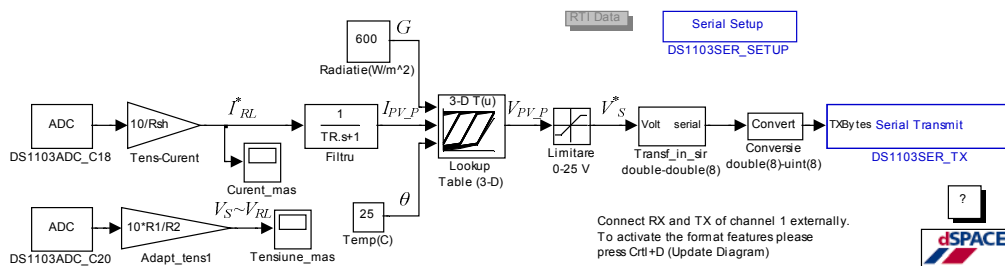


Fig. 3.4-1. Schema implementată pe modulul dSpace pentru cazul „emulator fără bloc compensator”

Realizarea fizică a schemei din Fig. 3.4-1 este prezentată în Fig. 3.4-2. În partea stângă a figurii este placa dSPACE, sub monitor este placa de adaptare semnal, urmată de cele 2 surse programabile iar în dreapta este rezistorul  $R_L$ .

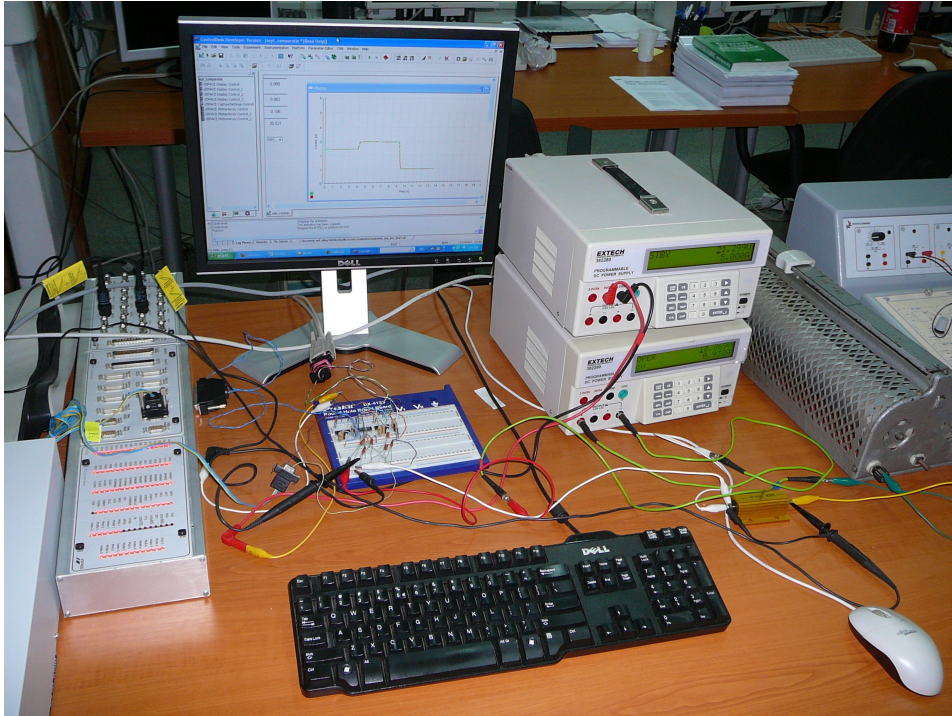


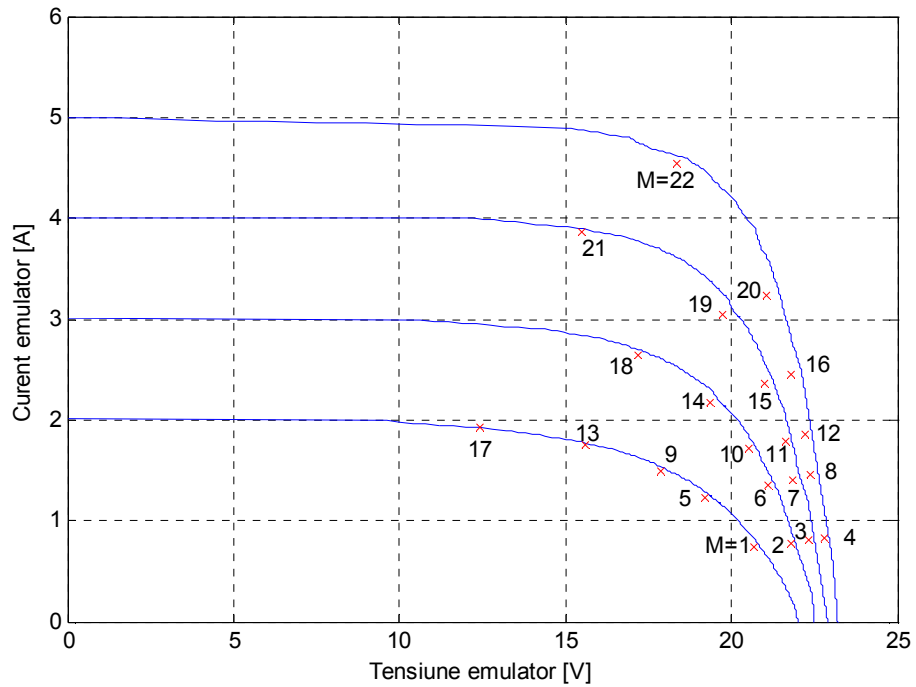
Fig. 3.4-2. Realizarea fizică a schemei din Fig. 3.4-1

*Experimentele de tip A* sunt efectuate cu scopul de a verifica modul în care caracteristicile  $I_{PV\_P}(V_{PV\_P})$  emulate reproduc caracteristicile modelate prin blocul Lookup Table. Experimentele s-au efectuat la două valori diferite de temperatură (experimentul A1 și experimentul A2) pentru 4 valori ale intensității radiației solare. Având în vedere faptul că potrivit schemei utilizate curentul de la intrarea blocului Lookup Table este în regim staționar constant identic cu curentul din circuitul de sarcină (neglijăm erorile de măsurare și conversie și căderea de tensiune pe shunt) ca eroare de emulare se poate considera eroarea de emulare a tensiunii:

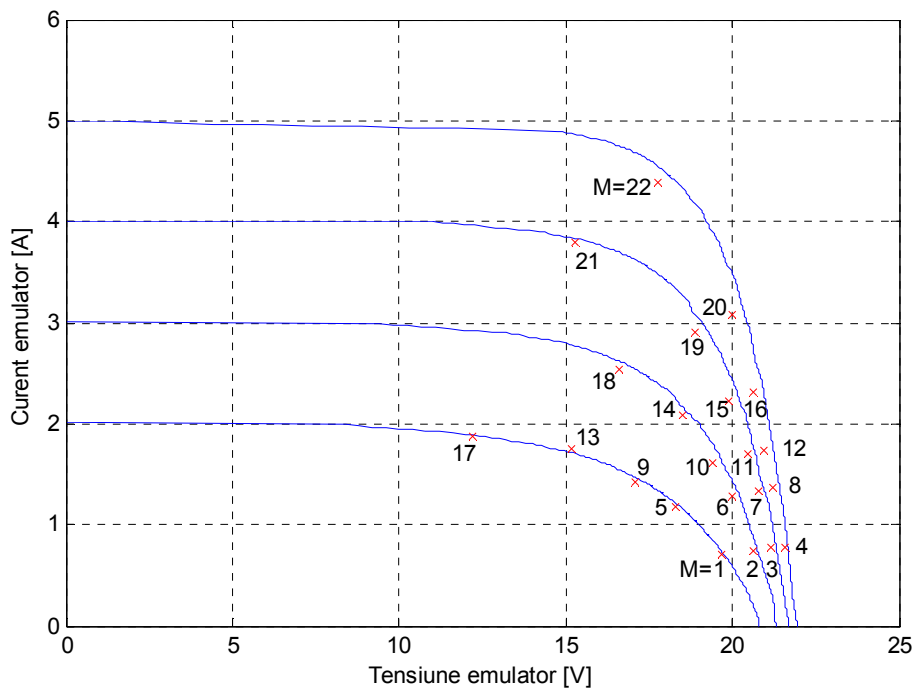
$$\varepsilon_V = \frac{|V_{PV\_P} - V_{R_L}|}{V_{PV\_P}} \cdot 100 \quad (3.4-1)$$

unde  $V_{PV\_P}$  este tensiunea de comandă a sursei programabile iar  $V_{R_L}$  este tensiunea măsurată la bornele  $R_L$ .

Experimentul A1 este realizat pentru o temperatură a panoului de 10 °C iar experimentul A2 este realizat pentru o temperatură a panoului de 25 °C. Punctele de funcționare obținute cu ajutorul emulatorului pentru diverse valori ale  $R_L$  sunt marcate cu 'x' și notate cu 'M'. Rezultatele corespunzătoare experimentul A1 sunt prezentate împreună cu caracteristicile  $I_{PV\_P}(V_{PV\_P})$  blocului Lookup Table în Fig. 3.4-3a) iar pentru experimentul A2 în Fig. 3.4-3b). Erorile de emulare sunt redată, respectiv, în Fig. 3.4-4a) și Fig. 3.4-4b).



-a-



-b-

Fig. 3.4-3. Punctele obținute pentru a)  $\theta = 10^\circ\text{C}$ ; b)  $\theta = 25^\circ\text{C}$

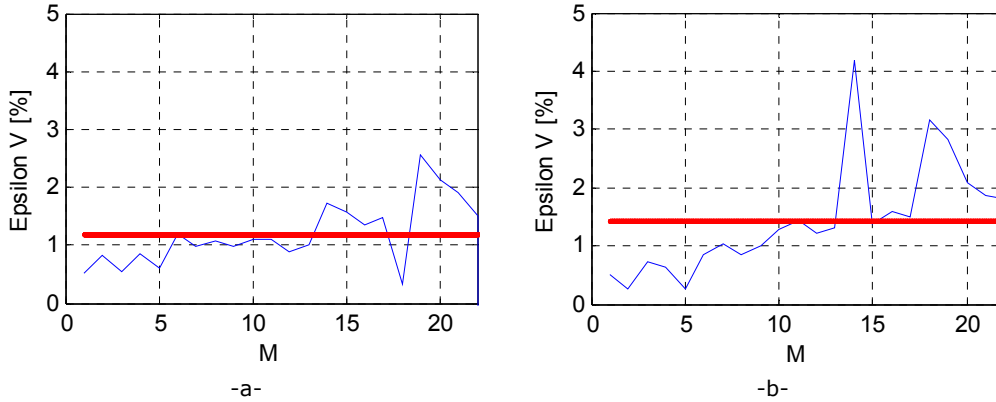


Fig. 3.4-4. Evoluția erorii  $\varepsilon_V$  și a erorii medii  $\bar{\varepsilon}_V$  pentru a)  $\theta=10$  °C; b)  $\theta=25$  °C

În cadrul experimentului A1 am obținut: eroarea minimă  $\varepsilon_{V_{\min}} = 0.32\%$ , eroarea maximă  $\varepsilon_{V_{\max}} = 2.55\%$  și eroarea medie  $\bar{\varepsilon}_V = 1.21\%$ .

Pentru experimentul A2 am obținut: eroarea minimă  $\varepsilon_{V_{\min}} = 0.25\%$ , eroarea maximă  $\varepsilon_{V_{\max}} = 4.19\%$  și eroarea medie  $\bar{\varepsilon}_V = 1.44\%$ .

Opinăm că rezultatele obținute în regim staționar constant sunt bune, eroarea medie fiind mai mică de 1.5% ( $\bar{\varepsilon}_V < 1.5\%$ ).

Experimentele de tip B efectuate sunt sistematizate în Tabelul 3.4-1. Tabelul precizează regimurile semnalelor de intrare, temperatura  $\theta(t)$  și radiația solară  $G(t)$ , valorile parametrului  $T_R$  al sursei (singurul parametru considerat ajustabil) și figurile care redau înregistrările efectuate în cursul experimentelor.

**Tabelul 3.4-1:** Experimente de tip B: Răspunsul emulatorului la variații ale semnalelor  $\theta(t)$  și  $G(t)$ . Emulatorul alimentează o rezistență de sarcină constantă ( $R_L \approx 8 \Omega$ )

$T_R \backslash \theta, G$	$\theta = 25$ °C $G =$ variabil	$\theta =$ variabil $G = 600$ W/m <sup>2</sup>	$\theta =$ variabil $G =$ variabil
$T_R=0.5$ secunde	Exp. B1 Fig. 3.4-2 a) $G(t)$ , b) $I_{PV_P}(t)$ , c) $V_{PV_P}(t)$ , d) $I(V)$	Exp. B2 Fig. 3.4-3 a) $G(t)$ , b) $I_{PV_P}(t)$ , c) $V_{PV_P}(t)$ , d) $I(V)$	Exp. B3 Fig. 3.4-4 a) $G(t)$ , b) $\theta(t)$ , c) $I_{PV_P}(t)$ , d) $V_{PV_P}(t)$ , e) $I(V)$
$T_R=0.03125$ secunde	Exp. B4 Fig. 3.4-5 a) $G(t)$ , b) $I_{PV_P}(t)$ , c) $V_{PV_P}(t)$ , d) $I(V)$	Exp. B5 Fig. 3.4-6 a) $G(t)$ , b) $I_{PV_P}(t)$ , c) $V_{PV_P}(t)$ , d) $I(V)$	Exp. B6 Fig. 3.4-7 a) $G(t)$ , b) $\theta(t)$ , c) $I_{PV_P}(t)$ , d) $V_{PV_P}(t)$ , e) $I(V)$

În figurile de mai jos, la care se referă Tabelul 3.4-1, caracteristicile corespunzătoare semnalelor de intrare prin care s-a impus scenariul de simulare și cele corespunzătoare blocului Lookup Table sunt reprezentate cu verde iar cele corespunzătoare semnalelor de la bornele emulatorului cu roșu.

Din înregistrări rezultă că în fiecare caz sistemul răspunde foarte bine la variațiile semnalelor de intrare.

- Astfel, cazul B1 redă comportarea emulatorului la o variație trapezoidală a semnalului  $G(t)$ . Creșterea radiației solare  $G$  de la valoarea de  $600 \text{ Wm}^{-2}$  la valoarea  $800 \text{ Wm}^{-2}$  se soldează cu creșterea valorilor curentului  $I_{PV\_P}$  și tensiunii  $V_{PV\_P}$  în lungul caracteristicii rezistenței de sarcină ca urmare a excursiei punctului de funcționare pe șirul de caracteristici externe de parametru  $G$ . La scăderea lui  $G$  până la nivelul de  $700 \text{ Wm}^{-2}$  punctul de funcționare reface parțial cursa în sens invers. În cazul B2 se urmărește efectul creșterii de temperatură cu 2 grade, iar apoi al scăderii temperaturii cu 1 grad. După cum era de așteptat efectul este aproape neglijabil. În cazul B3 scenariul redă comportarea emulatorului la variații trapezoidale simultane ale celor două semnale de intrare. Practic, datorită variațiilor reduse ale temperaturii se poate considera că variațiile de curent și de tensiune rezultă prin superpoziția variațiilor din primele două cazuri.
- Urmărind comparativ, cazurile B1 și B4, B2 și B5, respectiv B3 și B6 se constată că la scara de timp considerată în experimente valoarea lui  $T_R$  nu este importantă.

### Experimentul B1:

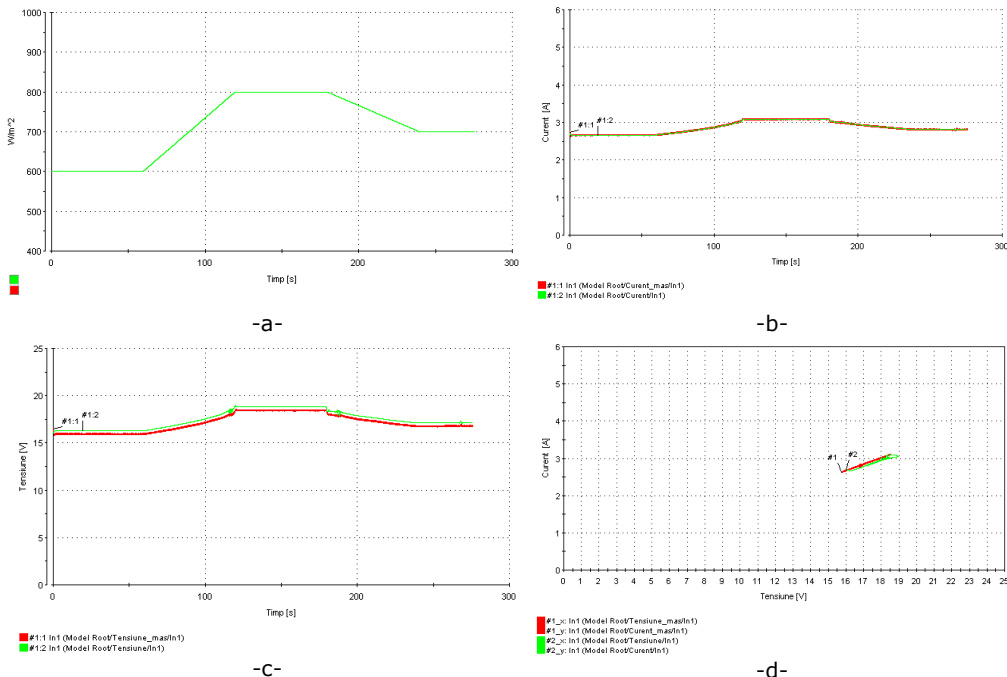


Fig. 3.4-5. Experimentul B1.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = \text{variabil}$ ,  $R_L \approx 8 \text{ } \Omega$ ,  $T_R = 0.5 \text{ secunde}$

**Experimentul B2:**

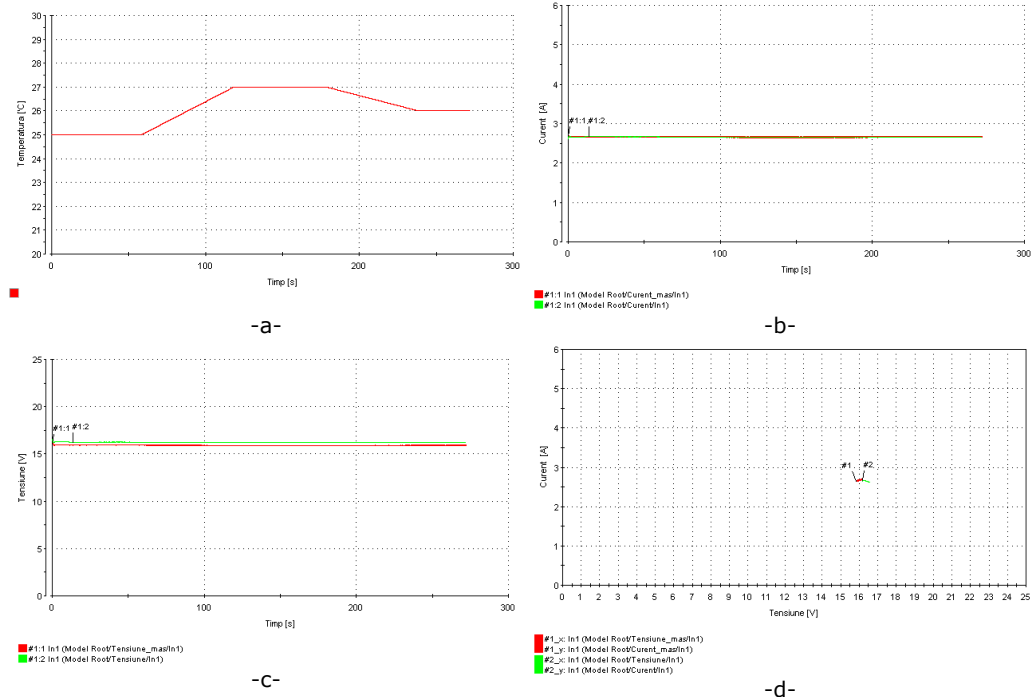


Fig. 3.4-6. Experimentul B2.  $\theta = \text{variabil}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ ,  $R_L \approx 8 \Omega$ ,  $T_R = 0.5 \text{ secunde}$

**Experimentul B3:**

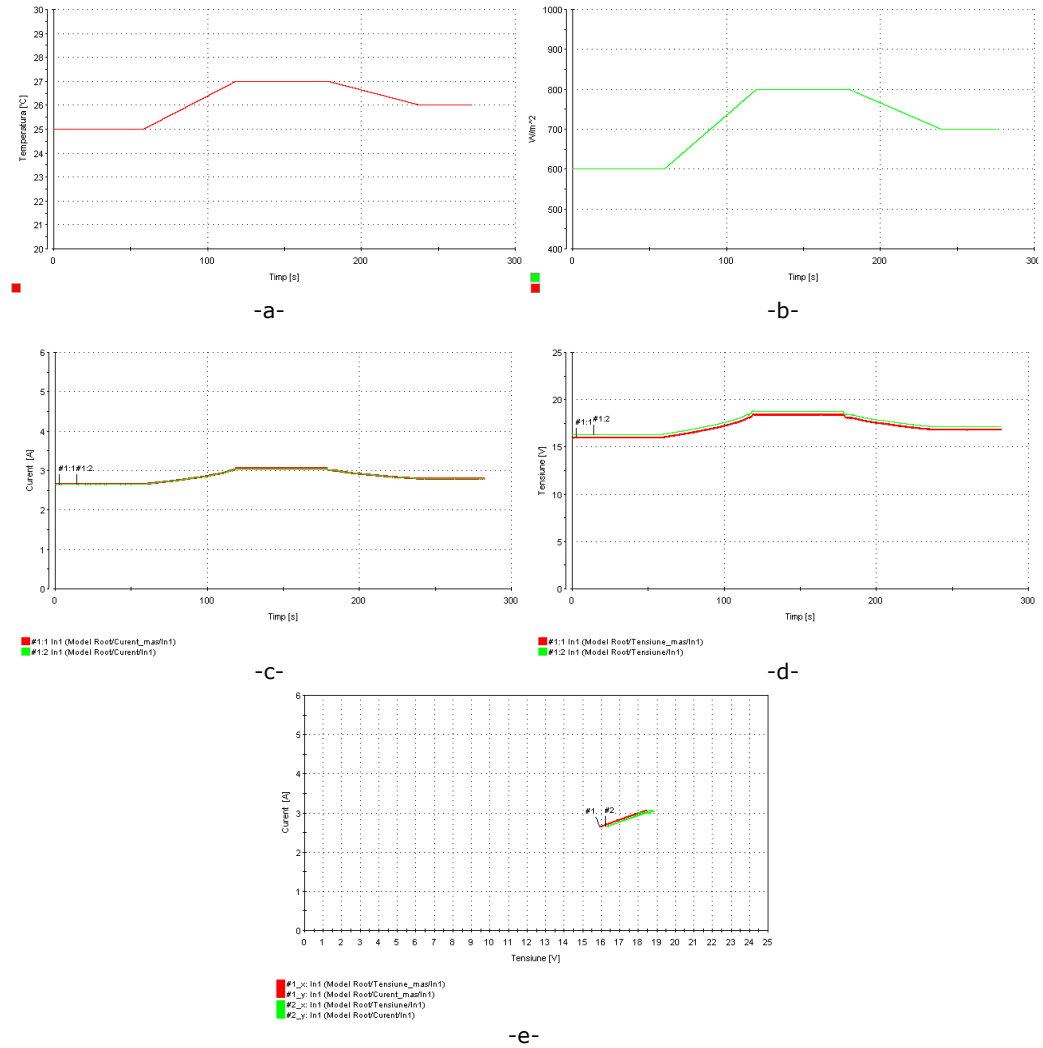


Fig. 3.4-7. Experimentul B3.  $\theta = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = \text{variabil}$ ,  $R_L \approx 8\ \Omega$ ,  $T_R = 0.5\text{ secunde}$



**Experimentul B4:**

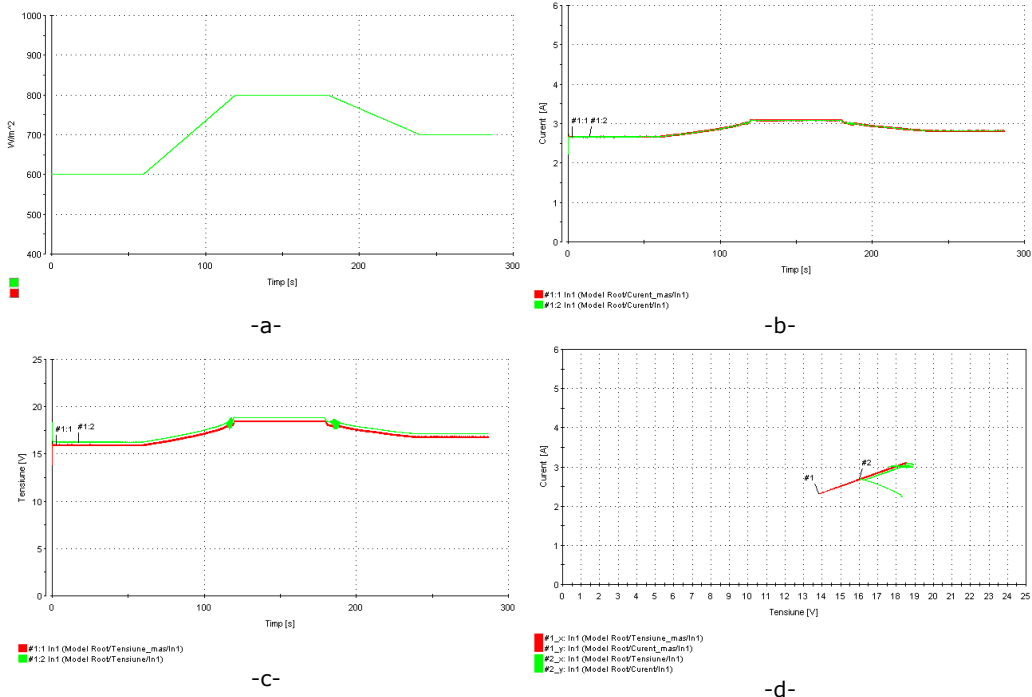
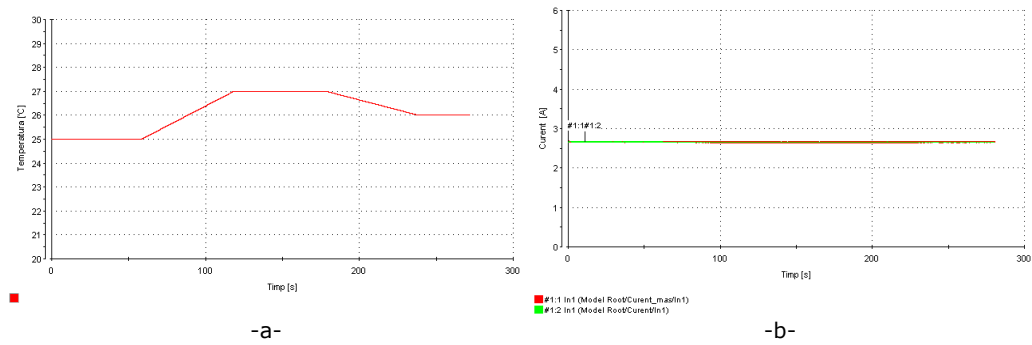


Fig. 3.4-8. Experimentul B4.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = \text{variabil}$ ,  $R_L \approx 8 \text{ } \Omega$ ,  $T_R = 0.03125 \text{ secunde}$

**Experimentul B5:**



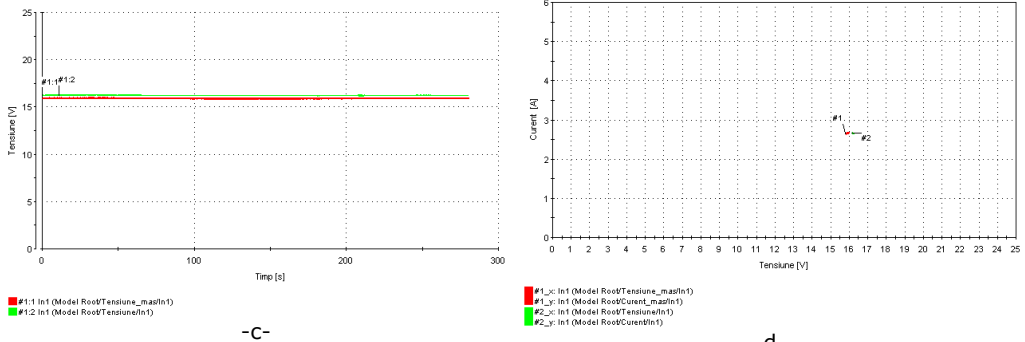
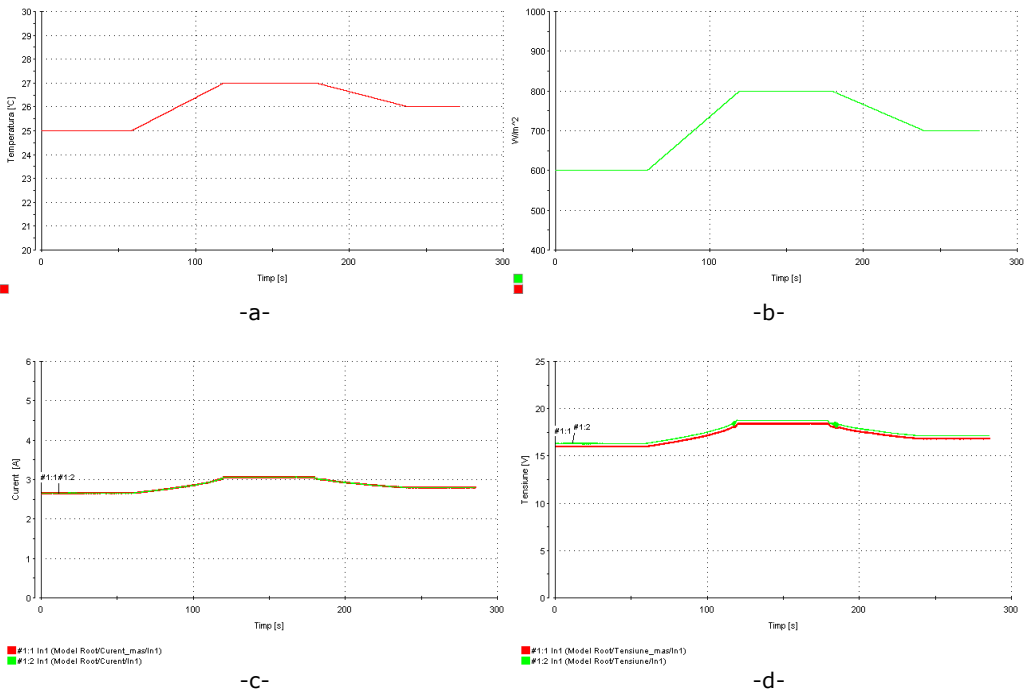
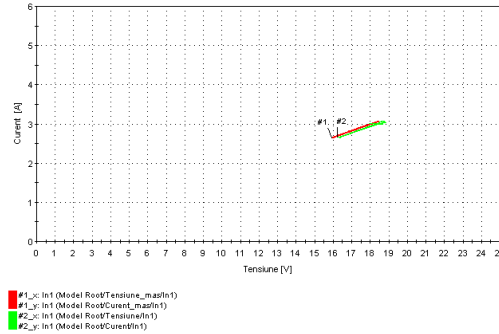


Fig. 3.4-9. Experimentul B5.  $\theta = \text{variabil}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ ,  $R_L \approx 8 \Omega$ ,  $T_R = 0.03125 \text{ secunde}$

**Experimentul B6:**





-e-

Fig. 3.4-10. Experimentul B6.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = \text{variabil}$ ,  $R_L \approx 8 \text{ } \Omega$ ,  $T_R = 0.03125 \text{ secunde}$

Experimentele de tip C efectuate sunt sistematizate în Tabelul 3.4-2. Ele corespund unor regimuri de funcționare determinate de modificări ale rezistenței de sarcină  $R_L$ . Un grup de experimente s-a realizat prin modificarea manuală a lui  $R_L$  în intervalul  $[10, 20] \text{ } \Omega$ . Un alt grup de experimente s-a realizat pentru modificarea valorii lui  $R_L$  prin scurtcircuitare (au fost utilizate 2 rezistoare de sarcină înseriate:  $R_{L1} \approx 10 \text{ } \Omega$  și  $R_{L2} \approx 25 \text{ } \Omega$ , deci  $R_L = R_{L1} + R_{L2}$  și s-a scurtcircuitat rezistența  $R_{L2}$ ). Figurile precizate în tabel redau înregistrările efectuate în cursul experimentelor.

**Tabelul 3.4-2:** Experimente de tip C: Răspunsul emulatorului la variații ale rezistenței de sarcină  $R_L$  (mărimile de intrare  $\theta$  și  $G$  sunt o constante,  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ )

$\theta, G$	$R_L \in [10, 20] \text{ } \Omega$ , modificată manual		$R_L \in \{10, 35\} \text{ } \Omega$ , modificată prin scurtcircuitare
	Incrementare $R_L$	Decrementare $R_L$	
$T_R = 2$ secunde	Exp. C1 Fig. 3.4-8 a) $I_{PV\_P}(t)$ , $I_{PV\_P}^*(t)$ , b) $V_{PV\_P}(t)$ , $V_{PV\_P}^*(t)$ , c) $I(V)$ , $I^*(V)$	Exp. C2 Fig. 3.4-9 a) $I_{PV\_P}(t)$ , $I_{PV\_P}^*(t)$ , b) $V_{PV\_P}(t)$ , $V_{PV\_P}^*(t)$ , c) $I(V)$ , $I^*(V)$	Exp. C3 Fig. 3.4-10 a) $I_{PV\_P}(t)$ , $I_{PV\_P}^*(t)$ , b) $V_{PV\_P}(t)$ , $V_{PV\_P}^*(t)$ , c) $I(V)$ , $I^*(V)$
$T_R = 1$ secunde	Exp. C4 Fig. 3.4-11 a) $I_{PV\_P}(t)$ , $I_{PV\_P}^*(t)$ , b) $V_{PV\_P}(t)$ , $V_{PV\_P}^*(t)$ , c) $I(V)$ , $I^*(V)$	Exp. C5 Fig. 3.4-12 a) $I_{PV\_P}(t)$ , $I_{PV\_P}^*(t)$ , b) $V_{PV\_P}(t)$ , $V_{PV\_P}^*(t)$ , c) $I(V)$ , $I^*(V)$	Exp. C6 Fig. 3.4-13 a) $I_{PV\_P}(t)$ , $I_{PV\_P}^*(t)$ , b) $V_{PV\_P}(t)$ , $V_{PV\_P}^*(t)$ , c) $I(V)$ , $I^*(V)$
$T_R = 0.5$ secunde	Exp. C7 Fig. 3.4-14 a) $I_{PV\_P}(t)$ , $I_{PV\_P}^*(t)$ , b) $V_{PV\_P}(t)$ , $V_{PV\_P}^*(t)$ , c) $I(V)$ , $I^*(V)$	Exp. C8 Fig. 3.4-15 a) $I_{PV\_P}(t)$ , $I_{PV\_P}^*(t)$ , b) $V_{PV\_P}(t)$ , $V_{PV\_P}^*(t)$ , c) $I(V)$ , $I^*(V)$	Exp. C9 Fig. 3.4-16 a) $I_{PV\_P}(t)$ , $I_{PV\_P}^*(t)$ , b) $V_{PV\_P}(t)$ , $V_{PV\_P}^*(t)$ , c) $I(V)$ , $I^*(V)$
$T_R =$ 0.03125 secunde	Exp. C10 Fig. 3.4-17 a) $I_{PV\_P}(t)$ , $I_{PV\_P}^*(t)$ , b) $V_{PV\_P}(t)$ , $V_{PV\_P}^*(t)$ , c) $I(V)$ , $I^*(V)$	Exp. C11 Fig. 3.4-18 a) $I_{PV\_P}(t)$ , $I_{PV\_P}^*(t)$ , b) $V_{PV\_P}(t)$ , $V_{PV\_P}^*(t)$ , c) $I(V)$ , $I^*(V)$	Exp. C12 Fig. 3.4-19 a) $I_{PV\_P}(t)$ , $I_{PV\_P}^*(t)$ , b) $V_{PV\_P}(t)$ , $V_{PV\_P}^*(t)$ , c) $I(V)$ , $I^*(V)$

În figurile de mai jos, la care se referă Tabelul 3.4-2, caracteristicile corespunzătoare blocului Lookup Table au fost reprezentate cu verde iar cele corespunzătoare mărimilor de la bornele emulatorului cu roșu. Din analizarea lor rezultă următoarele aspecte:

- Cu privire la cazurile C1, C4, C7 și C10 corespunzătoare creșterii lui  $R_L$  :
  - Comparând semnalele  $V_{PV\_p}^*(t)$  și  $V_{PV\_p}(t)$  rezultă că tensiunea la bornele emulatorului urmărește cu întârziere variațiile semnalului furnizat de blocul Lookup Table. Totodată, este vizibil efectul timpului mort al sursei programabile. Cele două semnale ajung să coincidă după 2 – 5 secunde, intervalul de timp fiind cu atât mai mic cu cât și valoarea lui  $T_R$  este mai mică. La valori foarte mici ale lui  $T_R$  (cazul C10) procesele din emulator devin subamortizate și ieșirea blocului Lookup Table prezintă un mic supraglaj.
  - Comparând semnalele  $I_{PV\_p}^*(t)$  și  $I_{PV\_p}(t)$  observăm efectul elementului de corecție (filtrul de curent): de data aceasta semnalul de la intrarea blocului Lookup Table rămâne în urma în urmă. Cu cât valorile lui  $T_R$  sunt mai mici, cu atât întârzierea este mai redusă. În cazul C10 ea nu mai este vizibilă.
  - Cumularea efectelor anterioare este vizibilă în caracteristicile  $I(V)$  din figurile C. Caracteristicile reprezentate cu verde redau caracteristica externă care trebuie emulată. Caracteristicile reprezentate cu roșu, situate sun cele reprezentate cu roșu, redau dependențele realizate de emulator. Este evident faptul că datorită limitărilor generatorului programabil, emulatorul își realizează cu precizie funcția doar la variații mai lente ale lui  $R_L$ . Cu cât generatorul programabil este mai performant în sensul că prezintă temporizări și timpi morți mai mici, și în sensul că admite la intrare semnale eșantionate cu frecvență mare de eșantionare, cu atât și performanțele sale de regim dinamic vor fi mai bune.
- Cu privire la cazurile C2, C5, C8 și C11 corespunzătoare reducerii valorii lui  $R_L$  :
  - Comparând semnalele  $V_{PV\_p}^*(t)$  și  $V_{PV\_p}(t)$  rezultă că pentru valori de 1 – 2 secunde a lui  $T_R$  tensiunea la bornele emulatorului urmărește cu precizie bună variațiile semnalului furnizat de blocul Lookup Table, pe când la valori reduse ale lui  $T_R$  se manifestă atât o întârziere ca și în primele patru cazuri cât și o tendință de subamortizare (cazul C11). Comportarea fiind calitativ diferită față de cea din primele 4 cazuri rezultă că datorită generatorului programabil se manifestă și un efect de histerezis.
  - Comparând semnalele  $I_{PV\_p}^*(t)$  și  $I_{PV\_p}(t)$  se observă o comportare asemănătoare ce cea din primele 4 cazuri. Cu cât valorile lui  $T_R$  sunt mai mici, cu atât întârzierea este mai redusă. În

cazul C11 ea nu mai este sesizabilă pe fondul unui proces vizibil subamortizat.

- Cumularea efectelor anterioare este vizibilă în caracteristicile  $I(V)$  din figurile V. De data aceasta caracteristicile reprezentate cu roșu, care redau dependențele realizate de emulator, se situează deasupra caracteristicilor reprezentate cu verde, care redau caracteristica externă care trebuie emulată.
- Cu privire la cazurile C3, C6, C9 și C12 corespunzătoare atât creșterii cât și reducerii valorii lui  $R_L$  prin descurtcircuitarea și scurtcircuitarea succesivă a lui  $R_{L2}$  :
  - Caracteristicile cumulează efectele identificate în primele 8 cazuri.
  - Efectul de histerzis apare ca neglijabil.
  - Sunt de preferat valori ale lui  $T_R > 0.5$  secunde.

**Experimentul C1:**

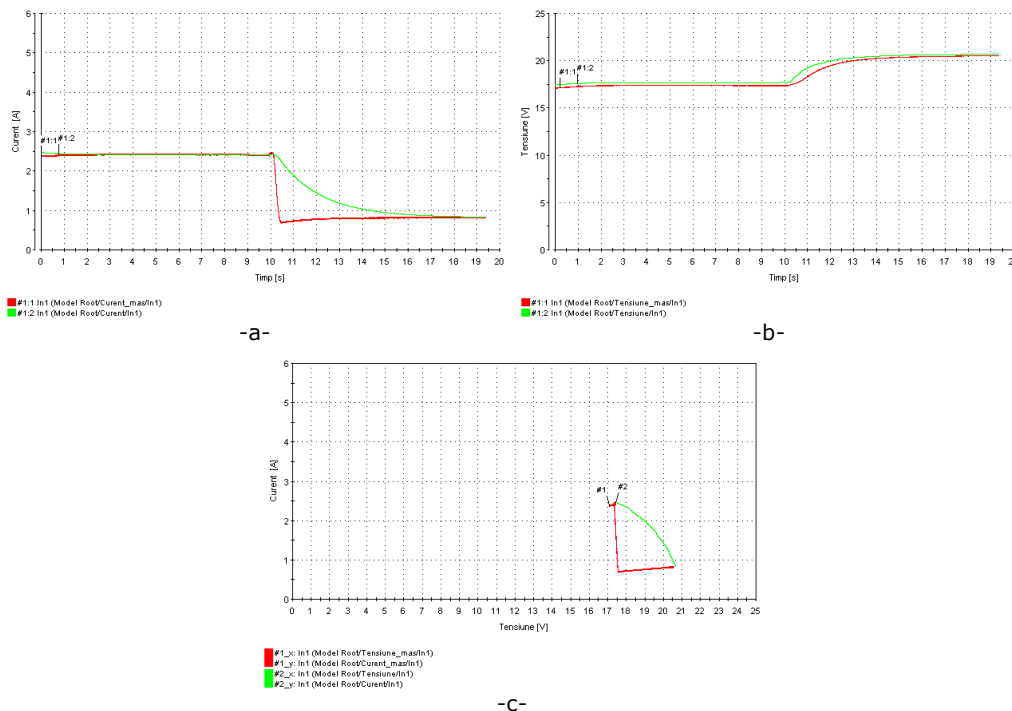


Fig. 3.4-11. Experimentul C1.  $\theta = 25$  °C,  $G = 600$  W/m<sup>2</sup>, incrementare  $R_L \in [10, 20] \Omega$ ,  $T_R = 2$  secunde

**Experimentul C2:**

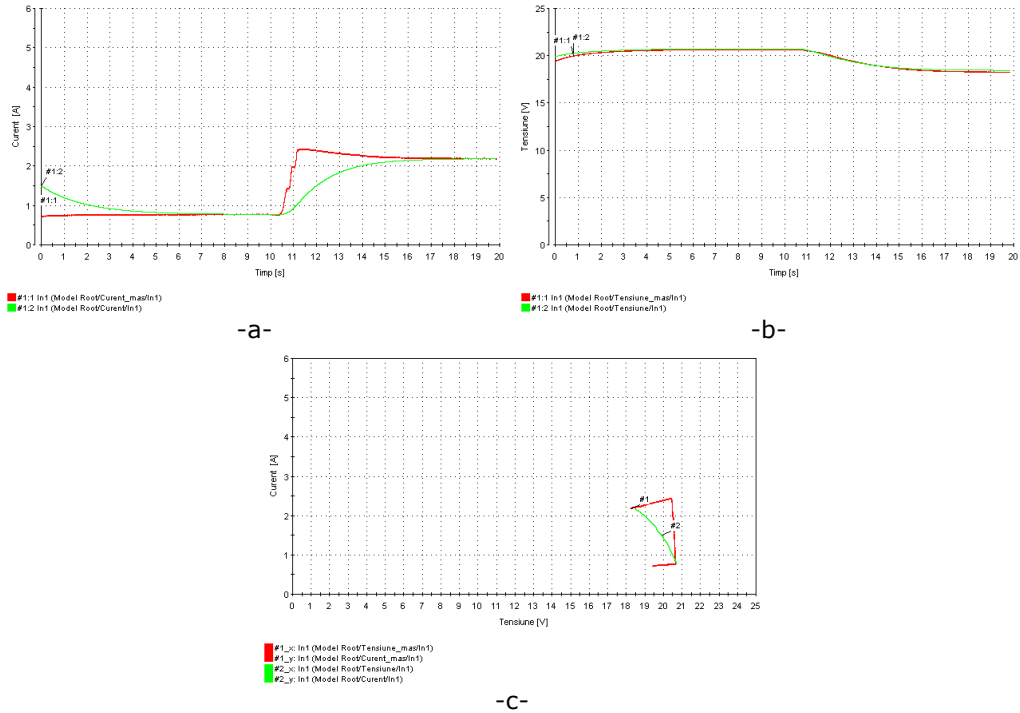
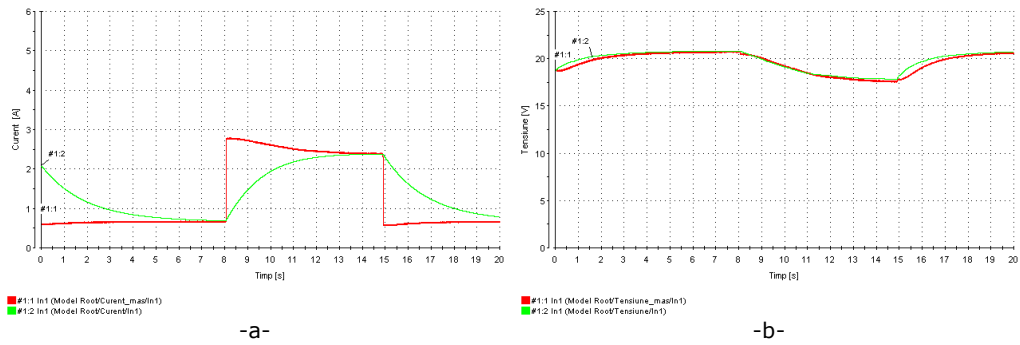
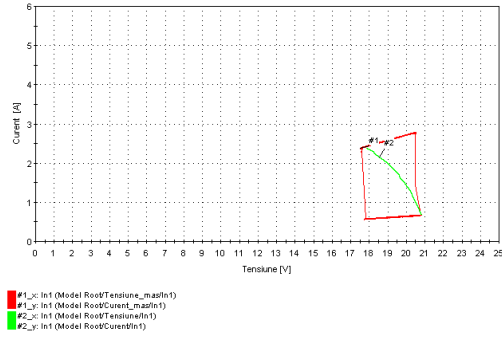


Fig. 3.4-12. Experimentul C2.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , decrementare  $R_L \in [20, 10] \Omega$ ,  $T_R = 2 \text{ secunde}$

**Experimentul C3:**

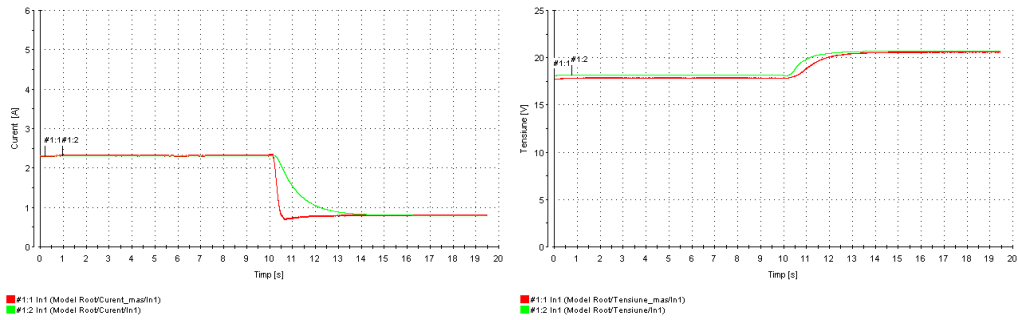




-C-

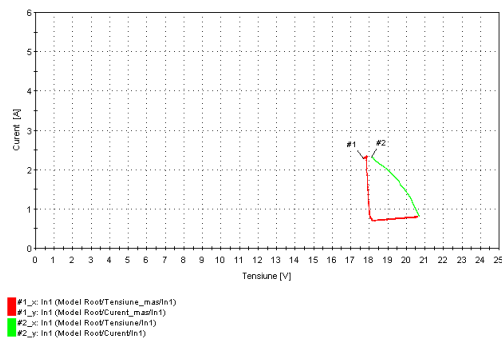
Fig. 3.4-13. Experimentul C3.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare  $R_L \in \{10, 35\} \Omega$ ,  $T_R = 2 \text{ secunde}$

**Experimentul C4:**



-a-

-b-



-C-

Fig. 3.4-14. Experimentul C4.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , incrementare  $R_L \in [10, 20] \Omega$ ,  $T_R = 1 \text{ secunde}$

**Experimentul C5:**

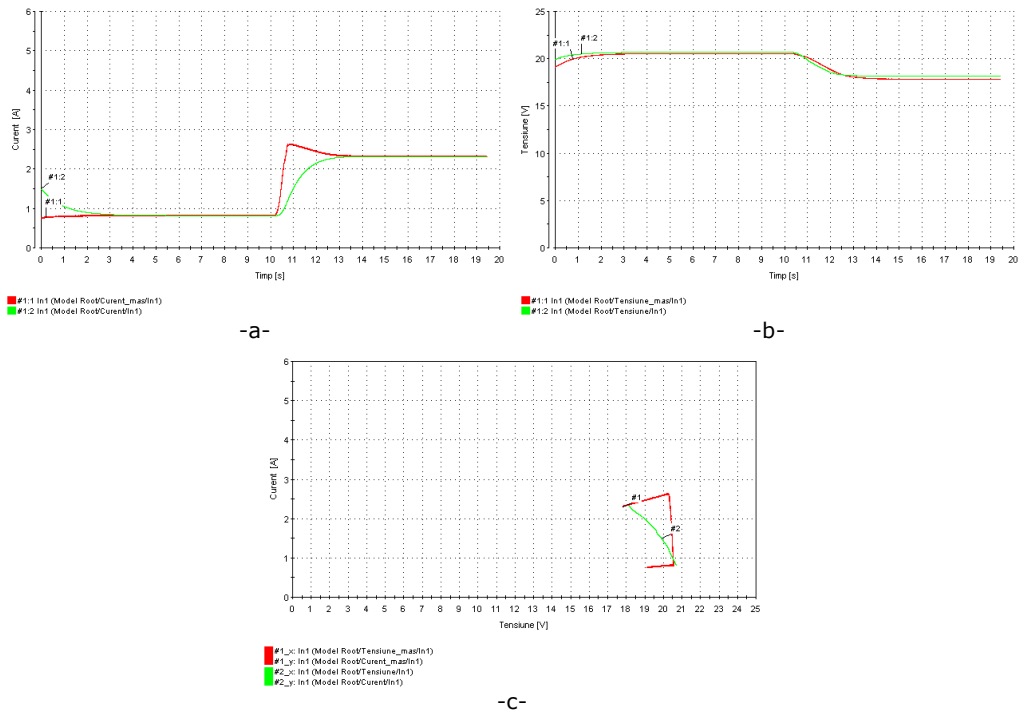
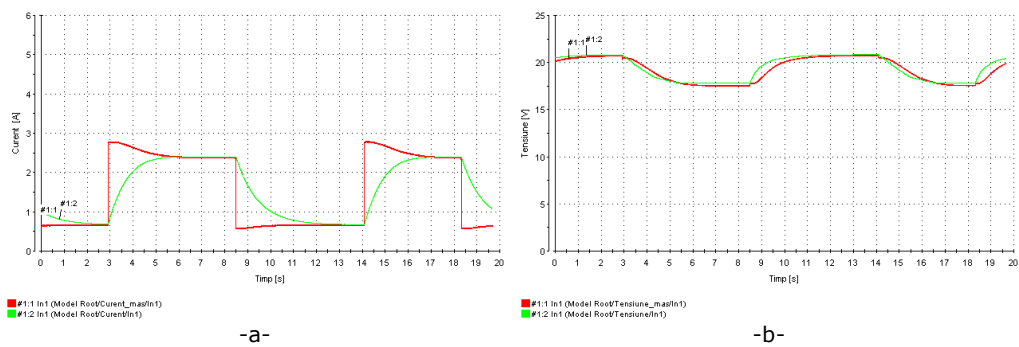
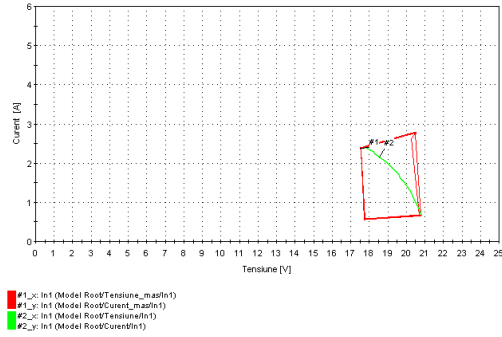


Fig. 3.4-15. Experimentul C5.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , decrementare  $R_L \in [20, 10] \Omega$ ,  $T_R = 1$  secunde

**Experimentul C6:**



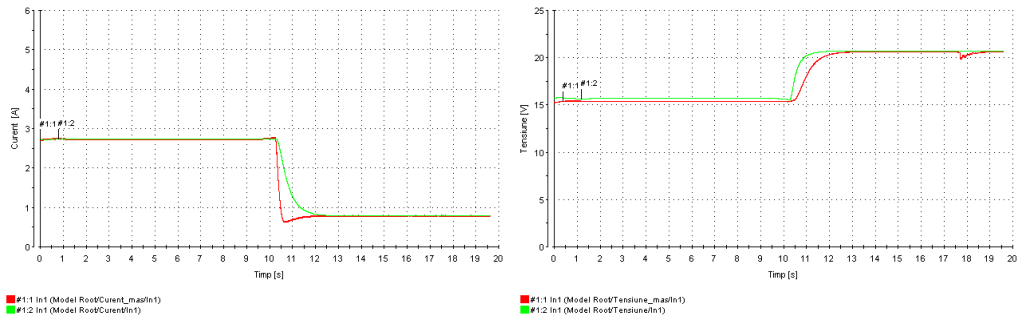




-C-

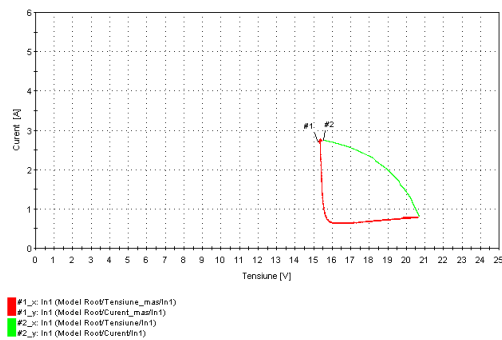
Fig. 3.4-16. Experimentul C6.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare  $R_L \in \{10, 35\} \Omega$ ,  $T_R = 1 \text{ secunde}$

**Experimentul C7:**



-a-

-b-



-C-

Fig. 3.4-17. Experimentul C7.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , incrementare  $R_L \in [10, 20] \Omega$ ,  $T_R = 0.5 \text{ secunde}$

**Experimentul C8:**

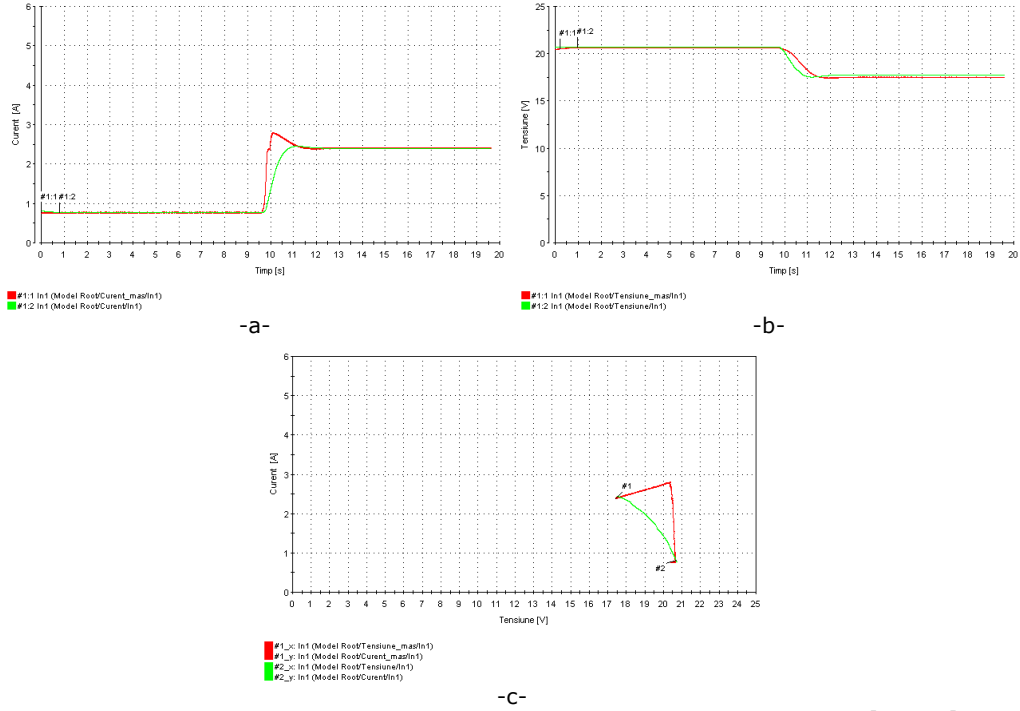
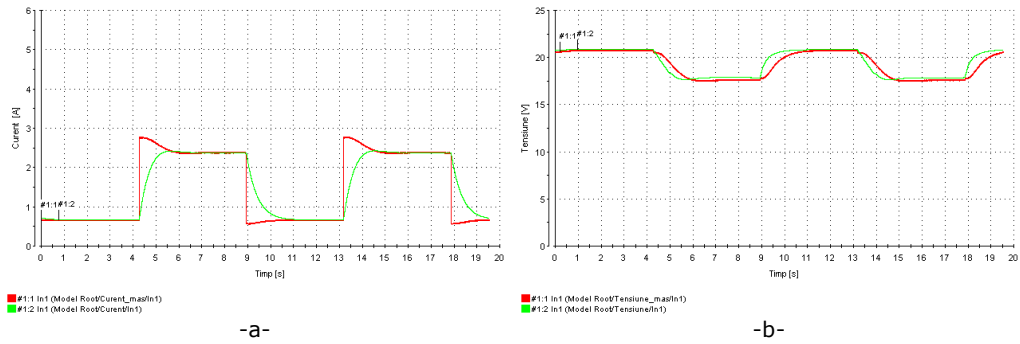
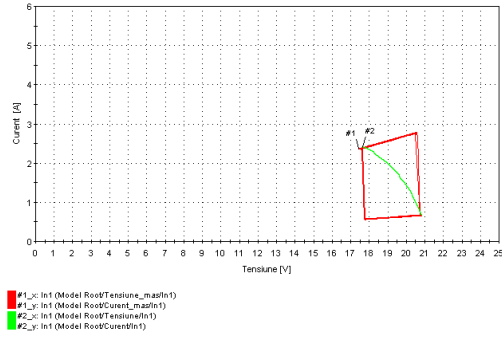


Fig. 3.4-18. Experimentul C8.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , decrementare  $R_L \in [20, 10] \Omega$ ,  $T_R = 0.5$  secunde

**Experimentul C9:**

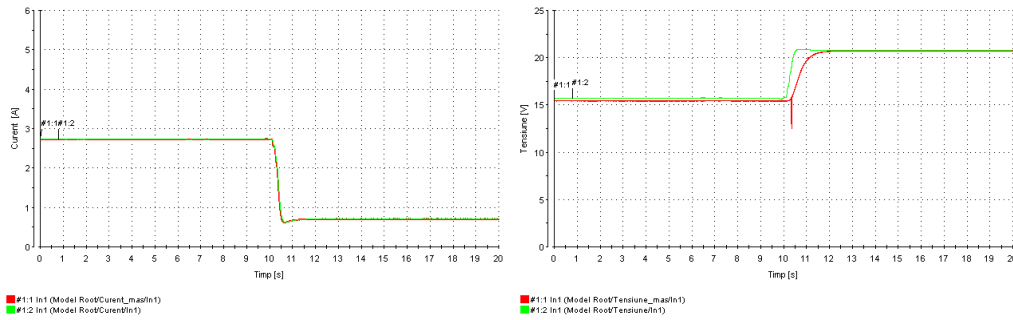




-C-

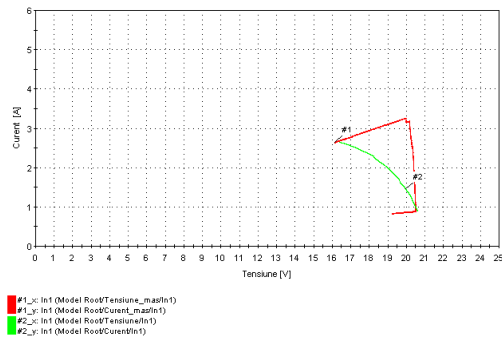
Fig. 3.4-19. Experimentul C9.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare  $R_L \in \{10, 35\} \Omega$ ,  $T_R = 0.5$  secunde

**Experimentul C10:**



-a-

-b-



-C-

Fig. 3.4-20. Experimentul C10.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , incrementare  $R_L \in [10, 20] \Omega$ ,  $T_R = 0.03125$  secunde

**Experimentul C11:**

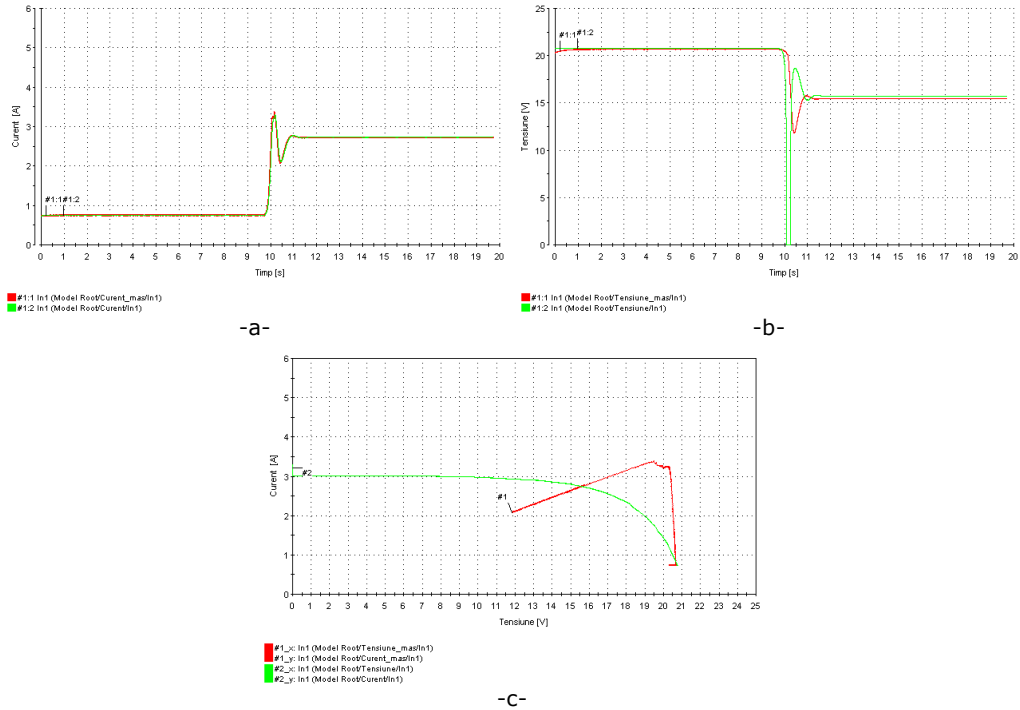
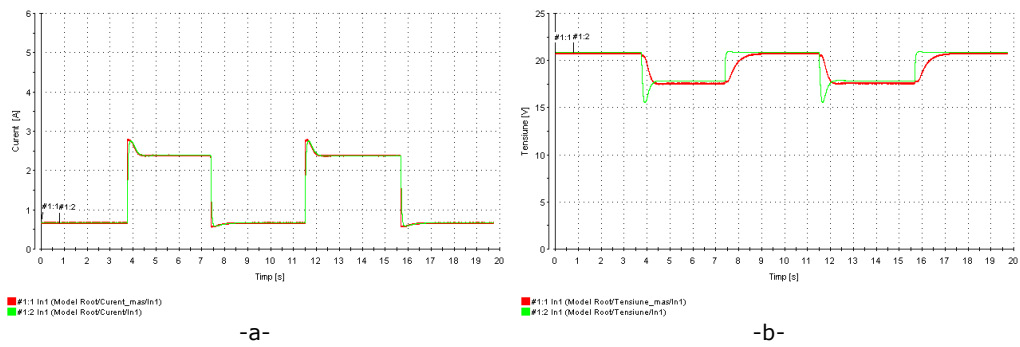


Fig. 3.4-21. Experimentul C11.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , decrementare  $R_L \in [20, 10] \Omega$ ,  $T_R = 0.03125$  secunde

**Experimentul C12:**



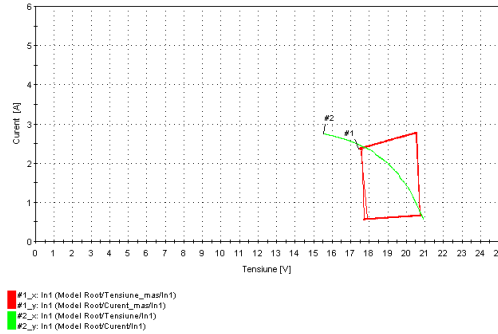


Fig. 3.4-22. Experimentul C12.  $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $G = 600\text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare  $R_L \in \{10, 35\}\ \Omega$ ,  $T_R = 0.03125$  secunde

Au fost efectuate experimente pentru alte valori ale lui  $T_R$ , experimente prezentate în Anexa 3.3. De asemenea, s-a testat utilizarea a două surse programabile identice, conectate în serie, comandate cu același semnal, experimente prezentate în Anexa 3.4.

Având în vedere oscilațiile care apar pentru valori mici ale parametrului  $T_R$  în experimentele de tip C s-a încercat amortizarea lor prin introducerea unui compensator suplimentar, de tip  $PDT_1$  cu funcția de transfer  $H(s)_{Compensator} = \frac{T_D s + 1}{T_1 s + 1}$  în schema emulatorului. Schema utilizată a fost cea din

Fig. 3.4-23.

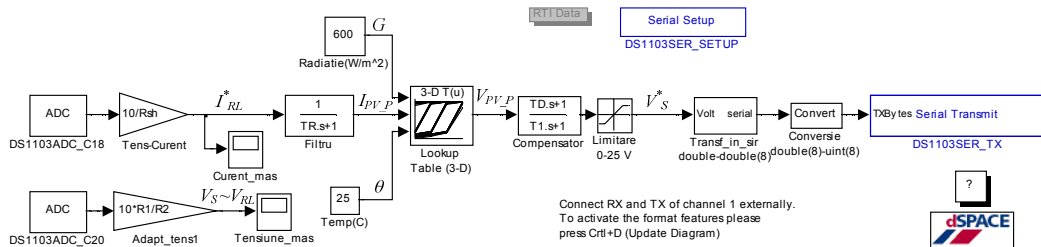


Fig. 3.4-23 Schema implementată pe modulul dSpace pentru cazul „emulator cu bloc compensator”

Valorile testate au fost:  $T_D \in [0.3, 0.6]$  secunde respectiv  $T_1 \in [0.001, 0.04]$  secunde. S-a încercat găsirea celui mai bun triplet  $\{T_R, T_D, T_1\}$ . Testele efectuate nu au condus la îmbunătățiri concludente, rezultatele obținute fiind foarte apropiate de cele sintetizate în Tabelul 3.4-1 și Tabelul 3.4-2. Câteva dintre experimente sunt prezentate cu titlu informativ în Anexa 3.5 fiind notate ca *Experimente tip D*.

## 4. DETERMINAREA PE BAZĂ DE MODELE A PUNCTULUI DE PUTERE MAXIMĂ (MPP) PENTRU PANOURILE FOTOVOLTAICE ȘI APLICAȚII

### 4.1. Problematika

În acest capitol referirile se fac doar cu privire la panouri fotovoltaice. Pentru a maximiza performanța energetică a panoului fotovoltaic (PV\_P) este necesară menținerea funcționării lui în punctului de putere maximă (MPP) sau în vecinătatea acestuia. Ca urmare a modificării permanente a caracteristicii externe  $I(V)$  în funcție de temperatura  $\theta$  și de intensitatea radiației globale  $G$ , în cursul funcționării panoului apare o modificare a caracteristicii  $P(V)$  respectiv a poziției MPP în funcție de valorile celor doi parametrii.

Din această perspectivă prezintă interes determinarea coordonatelor MPP vis-à-vis de caracteristicile  $P(V)$  și  $I(V)$ . Notăm cu  $I_{MPP}$ ,  $V_{MPP}$  și  $P_{MPP}$  curentul, tensiunea și puterea corespunzătoare MPP. La variația lui  $\theta$  și  $G$  cele trei mărimi descriu suprafețe:  $I_{MPP}(\theta, G)$ ,  $V_{MPP}(\theta, G)$  și  $P_{MPP}(\theta, G)$ .

Sistemele de reglare care deservesc panourile sunt destinate asigurării funcționării panoului în MPP sau în vecinătatea MPP.

În practică, în momentul de față se folosesc structuri de reglare de tip sisteme de reglare extremale care îndeplinesc cerința anterioară, prin diferite metode, toate bazate pe forma caracteristicii  $P(V)$ .

Determinarea prealabilă a suprafețele  $I_{MPP}(\theta, G)$ ,  $V_{MPP}(\theta, G)$  și  $P_{MPP}(\theta, G)$  poate furniza însă și o altă abordare având în vedere faptul că ele pot furniza mărimi de referință pentru buclele de automatizare. Ca urmare, prezintă importanță generarea (sinteza) acestor suprafețe. Deoarece ele nu pot fi determinate analitic ci doar numeric, modelarea lor poate fi făcută doar în variantă interpolativă. Pentru interpolare este necesară generarea de puncte de sprijin de forma  $(\theta, G, I_{MPP})$ ,  $(\theta, G, V_{MPP})$  sau  $(\theta, G, P_{MPP})$ . Această abordare constituie nucleul capitolului de față. Utilizarea coordonatelor MPP ca mărimi de referință prezintă următoarele avantaje potențiale:

- implementarea de strategii de reglare mai complexe;
- îmbunătățirea funcționării sistemelor de reglare extremale în situațiile în care determinarea MPP este afectată de erori;
- timp de reacție redus la modificare factorilor de mediu;
- modularizarea algoritmilor de conducere și utilizarea unor algoritmi de reglare simpli, cu consecințe favorabile asupra implementării acestora.

În paragraful 4.2 sunt prezentate metode de determinare a MPP bazate pe modele matematice (în subparagraful 4.2.1). Ele servesc pentru generarea punctelor de sprijin pentru modele de tip interpolativ din paragraful 4.3. În subparagraful 4.2.2 se prezintă în mod succint două metode de reglare de tip extremal, utilizabile, de asemenea, pentru extragerea de puncte de sprijin.

În practică numărul caracteristicilor externe  $I(V)$  care se determină experimental pentru un panou fotovoltaic este relativ redus. În consecință, este redus și numărul punctelor de sprijin  $(\theta, G, I_{MPP})$ ,  $(\theta, G, V_{MPP})$  sau  $(\theta, G, P_{MPP})$ , iar aceasta justifică folosirea modelelor de tip interpolativ pentru  $I_{MPP}(\theta, G)$ ,  $V_{MPP}(\theta, G)$  și  $P_{MPP}(\theta, G)$ . În paragraful 4.3 este prezentată o metodă de obținere prin interpolare a suprafețelor  $I_{MPP}(\theta, G)$ ,  $V_{MPP}(\theta, G)$  și  $P_{MPP}(\theta, G)$ . În prima parte, în sub paragraful 4.3.1. se prezintă metoda de obținere a modelelor de tip interpolativ. Ea folosește M-2D al unui dispozitiv fotovoltaic, se bazează pe folosirea metodei de interpolare globale a lui Shepard și a fost propusă de autorul tezei în lucrarea [Dragomir 2010c]. O manieră de utilizare a acestor modele într-un caz real este tratată în subparagraful 4.3.2. Estimarea coordonatelor MPP se face în funcție de poziția panoului, temperatura ambiantă și de intensitatea radiației directe și difuze. Funcțiile de interpolare folosite pentru determinarea suprafețelor de la punctul 4.3.1 se verifică în subparagraful 4.3.3 cu ajutorul metodei Tsuno [Tsuno 2009].

Suprafețele obținute sunt folosite în paragraful 4.4 pentru studiul comportării unui sistem de conducere cu generarea referinței prin interpolare. În capitolul 1, paragraful 1.4, au fost prezentate principalele structuri de sisteme cu panouri fotovoltaice. Un element indispensabil al unui astfel de sistem îl reprezintă „Grupul de conversie DC-DC” (Fig. 1.4-2), alcătuit din unul sau mai multe convertoare DC-DC. Rolul convertorului este de a asigura modificarea raportului  $\rho$  dintre valoarea medie a tensiunii de intrare  $\bar{V}_{IN}$  și valoarea medie a tensiunii de ieșire  $\bar{V}_{OUT}$  la o valoare prescrisă prin factorul de umplere  $u$  al semnalului de comandă a convertorului. În cadrul studiului, pentru modificarea punctului de funcționare sunt utilizate convertoare de tip buck respectiv de tip boost. La finalul paragrafului 4.4 este prezentată și structura de reglare utilizată pentru menținerea funcționării panoului fotovoltaic în vecinătatea MPP prescris și simulările care au validat soluția folosită.

## 4.2. Metode de determinare MPP

### 4.2.1. Determinarea MPP folosind diferite modele matematice

Pentru toate metodele de determinare a MPP pe bază de modele matematice se consideră cunoscuți toți parametrii modelului caracteristicii externe utilizate.

De regulă, pentru determinarea MPP se folosește caracteristica  $P(V)$  a PV\_P, obținută pe baza modelului caracteristicii externe  $I(V)$ , și a relației

$$P=I \cdot V . \quad (4.2-1)$$

#### 4.2.1.1. Determinarea MPP pentru M-1D

Folosind relațiile (2.2-5) și (4.2-1) obținem pentru puterea  $P$  formula:

$$P = \left[ I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \right] \cdot V \quad (4.2-2)$$

Valoarea maximă a puterii se obține pentru  $V = V_{MPP}$  determinată ca soluție a ecuației transcendente

$$\left(1 + \frac{V_{MPP}}{V_T}\right) \cdot e^{\frac{V_{MPP}}{V_T}} = 1 + \frac{I_{Ph}}{I_0},$$

iar ale lui  $I_{MPP}$  și  $P_{MPP}$  prin substituirea lui  $V_{MPP}$  în (2.2-5) și (4.2-1):

$$I_{MPP} = \frac{I_{Ph} + I_0}{1 + \frac{V_T}{V_{MPP}}}, \quad P_{MPP} = \frac{(I_{Ph} + I_0) \cdot V_{MPP}^2}{V_{MPP} + V_T}.$$

#### 4.2.1.2. Determinarea MPP pentru M-1De

Pentru acest caz se folosește modelul (2.2-10) împreună cu relația (4.2-1). Datorită caracterului implicit al ecuației transcendente corespunzătoare relației (2.2-10) nu se poate obține o relație explicită a lui  $P$ . Pentru determinarea MPP se poate folosi metoda prezentată în paragraful 4.2.1.3, observând că M-1De poate fi considerat un caz particular al M-2D. În adevăr, înlocuind în (2.2-14):  $I_{01} = I_0$ ,  $V_{T1} = V_T$ ,  $I_{02} = 0$ , se obține (2.2-10).

#### 4.2.1.3. Determinarea MPP pentru M-2D

Determinării MPP pentru M-2D de expresie (2.2-14) prezintă un anumit grad de dificultate datorită caracterului implicit al ecuației transcendente (2.2-14) care nu permite explicitarea unei formule de calcul a puterii furnizate de panou. Coordonatele MPP se pot calcula doar folosind metode numerice de rezolvare a ecuației transcendente. În urma răspândirii mediilor de calcul numeric, în particular a mediului Matlab/Simulink, se poate vorbi atât despre folosirea explicită a metodelor numerice, atunci când utilizatorul controlează în detaliu calculele efectuate, cât și despre folosirea implicită a metodelor numerice, atunci când operează modularizat cu instrucții Matlab sau cu blocuri Simulink.

În continuare, în cadrul paragrafului se prezintă o metodă de folosire implicită a metodelor numerice pentru determinarea coordonatelor MPP. Procedeu, bazat pe folosirea unui model Simulink, a fost publicată de autor în lucrarea [Dragomir 2010b].

Pentru început, în paragraful 4.2.1.3.1 se stabilește sistemul de ecuații care are ca soluție coordonatele punctului de putere maximă,  $(V_{MPP}, I_{MPP})$ , iar apoi, în paragraful 4.2.1.3.2. se prezintă modul de integrare a ecuațiilor printr-un model Simulink.

##### 4.2.1.3.1. Stabilirea sistemului de ecuații care furnizează coordonatele MPP

Coordonatele  $(V_{MPP}, I_{MPP})$  se obțin ca soluții ale unui sistem de două ecuații cu două necunoscute.

Prima din aceste două ecuații rezultă din expresia (2.2-14) a caracteristicii externe  $I(V)$  rescrisă sub forma:

$$V - I_{Ph} \cdot R_P + I_{01} \cdot R_P \cdot \left( e^{\frac{V + I \cdot R_S}{V_{T1}}} - 1 \right) + I_{02} \cdot R_P \cdot \left( e^{\frac{V + I \cdot R_S}{V_{T2}}} - 1 \right) + (R_S + R_P) \cdot I = 0.$$



(4.2-3)

Notând expresia din membrul stâng cu  $F_1(V, I)$ .

$$F_1(V, I) = V - I_{ph} \cdot R_p + I_{01} \cdot R_p \cdot \left( e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T1}}} - 1 \right) + I_{02} \cdot R_p \cdot \left( e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T2}}} - 1 \right) + (R_S + R_p) \cdot I, \quad (4.2-4)$$

prima ecuație devine

$$F_1(V, I) = 0, \forall V, I \in (V(I), I). \quad (4.2-5)$$

Pentru a obține a doua ecuație avem în vedere că dependența  $P(V)$ , continuă și derivabilă, are un singur maximum. Ca urmare, punctul  $(V_{MPP}, I_{MPP})$  va verifica condiția  $\frac{dP}{dV} = 0$ , care, având în vedere (4.2-1), devine  $\frac{d(I \cdot V)}{dV} = 0$ , respectiv

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (4.2-6)$$

Din (2.2-14) deducem

$$\frac{dI}{dV} = -I_{01} \frac{d}{dV} \left( e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T1}}} \right) - I_{02} \frac{d}{dV} \left( e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T2}}} \right) - \frac{d}{dV} \left( \frac{V+I \cdot R_S}{R_p} \right). \quad (4.2-7)$$

Prin dezvoltarea derivatelor din (4.2-7) și ținând seama de (4.2-6) rezultă că punctul de maxim trebuie să satisfacă și ecuația

$$I + (I \cdot R_S - V) \cdot \left( \frac{I_{01}}{V_{T1}} \cdot e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T1}}} + \frac{I_{02}}{V_{T2}} \cdot e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T2}}} + \frac{1}{R_p} \right) = 0. \quad (4.2-8)$$

Definim acum funcția  $F_2(V, I)$  ca derivată în raport cu curentul  $I$  a expresiei din membrul stâng al egalității (4.2-8):

$$F_2(V, I) = \frac{d}{dt} \left( I + (I \cdot R_S - V) \cdot \left( \frac{I_{01}}{V_{T1}} \cdot e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T1}}} + \frac{I_{02}}{V_{T2}} \cdot e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T2}}} + \frac{1}{R_p} \right) \right). \quad (4.2-9)$$

După efectuarea calculelor și considerarea relației (4.2-6) obținem:

$$F_2(V, I) = 1 + R_S \cdot \left( \frac{I_{01}}{V_{T1}^2} \cdot (V_{T1} + I \cdot R_S - V) \cdot e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T1}}} + \frac{I_{02}}{V_{T2}^2} \cdot (V_{T2} + I \cdot R_S - V) \cdot e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T2}}} + \frac{1}{R_p} \right) \quad (4.2-10)$$

Rezultatul reprezintă cea de a doua ecuație căutată și îl reținem sub forma:

$$F_2(V, I) = 0, \text{ pentru } V = V_{MPP} \text{ și } I = I_{MPP}. \quad (4.2-11)$$

Orice pereche de valori  $(V, I)$  care verifică ecuația (4.2-8) va verifica și ecuația (4.2-11). În consecință, punctul de maximum  $(V_{MPP}, I_{MPP})$  al caracteristicii externe se obține ca soluție a sistemului format din ecuațiile (4.2-3) și (4.2-8) sau a sistemului alcătuit din ecuațiile (4.2-5) și (4.2-11).

#### 4.2.1.3.2. Sinteza modelului Simulink utilizat pentru determinarea MPP (modelul „Determinare MPP”).

Pentru a soluționa sistemul de ecuații algebrice (4.2-5)-(4.2-11) considerăm că atât tensiunea  $V$  cât și curentul  $I$  sunt funcții de timpul  $t$ , adică  $V(t)$ ,  $I(t)$ , iar în acest context îi asociem sistemului (4.2-5)-(4.2-11) sistemul dinamic neliniar de ordinul II (4.2-12) cu  $V$  și  $I$  ca variabile de stare:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = -k_1 \cdot F_1(V, I) \\ \frac{dI}{dt} = -k_2 \cdot F_2(V, I) \end{cases}, \quad (4.2-12)$$

în care  $k_1$  și  $k_2$  sunt constante reale strict pozitive.

După cum se va demonstra în continuare, acest sistem neliniar are în domeniul de lucru un singur punct de echilibru, starea corespunzătoare lui fiind asimptotic stabilă. Odată ajuns în această stare derivatele temporale din (4.2-12) se anulează, iar sistemul de ecuații diferențiale (4.2-12) se reduce la sistemul algebric alcătuit din ecuațiile (4.2-5) și (4.2-11). Deci acest sistem are în domeniul de lucru o singură soluție:  $V = V_{MPP}$  și  $I = I_{MPP}$ , adică tocmai MPP. Mai mult, indiferent care ar fi condițiile inițiale din domeniul de lucru, nivelurile la care se stabilizează  $V$  și  $I$  rămân  $V_{MPP}$  și  $I_{MPP}$ .

Pentru a demonstra stabilitatea sistemului (4.2-12) considerăm funcția pătratică:

$$\mathcal{L} = (V - V_{MPP})^2 + (I - I_{MPP})^2. \quad (4.2-13)$$

Această funcție este pozitiv definită, întrucât  $\mathcal{L}(V, I) > 0, (V, I) \neq (V_{MPP}, I_{MPP})$ , și se anulează în punctul  $(V_{MPP}, I_{MPP}) = 0$ ,  $\mathcal{L}(V_{MPP}, I_{MPP}) = 0$ . Derivata temporală a lui  $\mathcal{L}$  este  $\frac{d\mathcal{L}}{dt} = 2(V - V_{MPP})\frac{dV}{dt} + 2(I - I_{MPP})\frac{dI}{dt}$ , respectiv

$$\frac{d\mathcal{L}}{dt} = -2 \cdot [k_1 \cdot (V - V_{MPP}) \cdot F_1(V, I) + k_2 \cdot (I - I_{MPP}) \cdot F_2(V, I)]. \quad (4.2-14)$$

Potrivit celor prezentate în [Petcuț 2010a]

$$-(V - V_{MPP}) \cdot F_1(V, I) < 0 \text{ pentru } V \neq V_{MPP}, V \in [0, V_0] \quad (4.2-15)$$

În ceea ce privește expresia  $F_2(V, I)$ , plecând de la ordinul de mărime al diferiților termeni se poate arăta cu ușurință că  $F_2$  este monoton crescătoare în raport cu  $I$  și se anulează pentru  $I = I_{MPP}$ . De exemplu, în cazul particular al panoului LD 664431, produs de LD Systems AG&Co KG [PV\_P1], cu parametrii  $V_{T1}=520.63 \cdot 10^{-3}$  V;  $V_{T2}=972.03 \cdot 10^{-3}$  V;  $I_{01}=138.84 \cdot 10^{-12}$  A;  $I_{02}=25.92 \cdot 10^{-9}$  A;  $R_S=2.589$   $\Omega$ ;  $R_P=131.92$   $\Omega$ ;  $I_{ph}=0.45883$  A,  $F_2$  variază în raport cu  $I$  ca în Fig. 4.2-1.

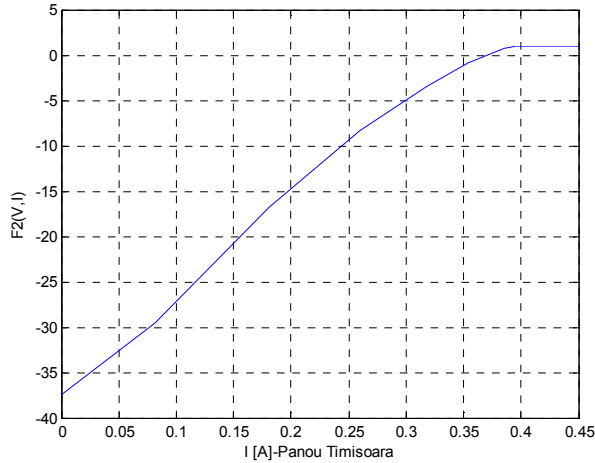


Fig. 4.2-1. Dependența  $F_2(I)$

Deoarece pentru  $I < I_{MPP}$  avem  $F_2 < 0$ , iar pentru  $I > I_{MPP}$  avem  $F_2 > 0$  deducem că:

$$-(I - I_{MPP}) \cdot F_2(V, I) < 0 \quad I \neq I_{MPP}, I \in [0, I_{SC}] \quad (4.2-16)$$

Așadar,  $\frac{d\mathcal{L}}{dt} < 0$ , dacă  $V \neq V_{MPP}, V \in [0, V_0]$  și  $I \neq I_{MPP}, I \in [0, I_{SC}]$ .

În consecință  $\mathcal{L}$  este o funcție Liapunov, iar sistemul (4.2-12) este local asimptotic stabil în domeniul  $[0, V_{OC}] \times [0, I_0]$  stabilizându-se chiar în MPP.

Sistemului (4.2-12) îi corespunde modelul Simulink din Fig. 4.2-2. Amplificările  $k_1$  și  $k_2$  au rolul de a permite corelarea vitezelor de integrare ale celor două integroare și de a controla durata regimului tranzitoriu.

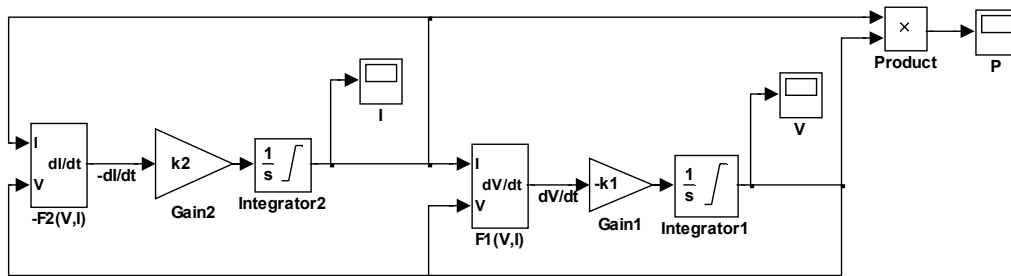
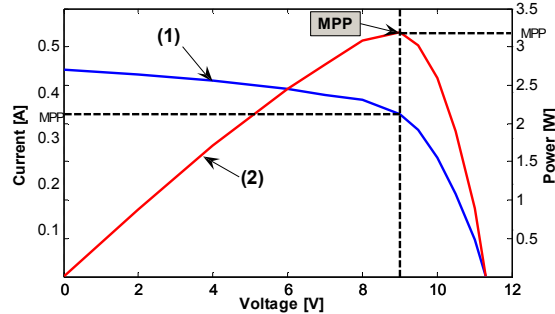


Fig. 4.2-2. Modelul Simulink - "Determinare MPP"

#### 4.2.1.3.3. Exemplificare - rezultate obținute pentru panoul LD 664431

Pentru validarea metodei propuse se consideră un panou fotovoltaic cu caracteristicile  $I(V)$  respectiv  $P(V)$  din Fig. 4.2-3 (panou de tip LD 664431).

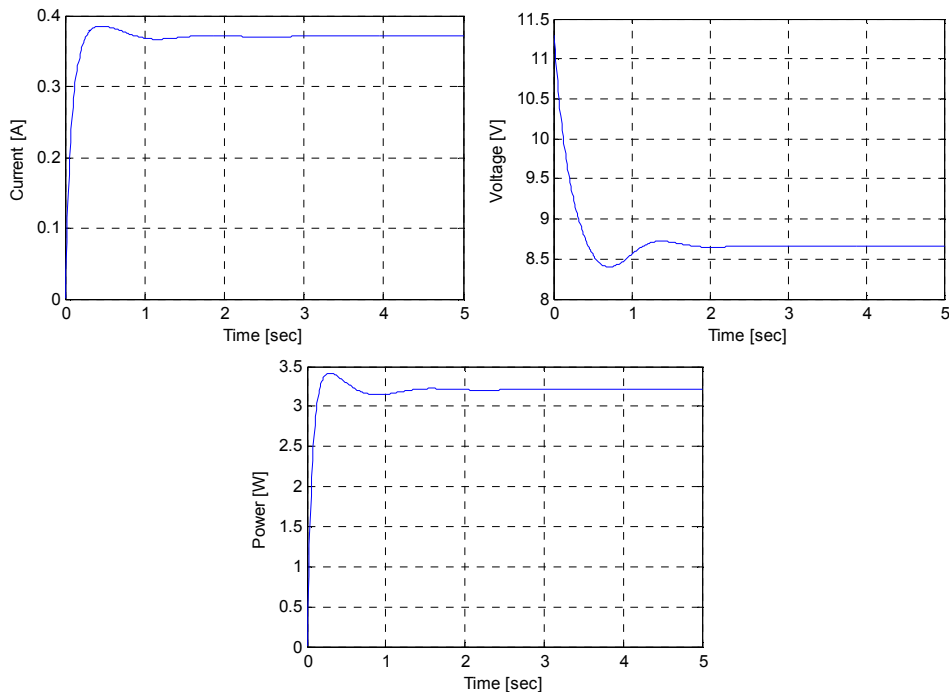
Fig. 4.2-3 (1)-caracteristica  $I(V)$  și (2)-caracteristica  $P(V)$  ale PV\_P LD 664431

Pentru rezolvarea sistemului (4.2-5) - (4.2-11) cu ajutorul modelului Simulink din Fig. 4.2-2 corespunzător sistemul (4.2-12) s-au considerat diferite condiții inițiale  $\{V(0), I(0)\}$  din domeniul:  $[0, V_{OC}] \times [0, I_{SC}]$ . În continuare se prezintă două dintre scenariile avute în vedere.

*Determinare MPP - Scenariul 1:  $V(0)=11.3$  V și  $I(0)=0.001$  A*

- Cele două valorile inițiale corespund unui punct de pe caracteristica  $I(V)$ , apropiat de punctul de mers în gol.

În Fig. 4.2-4 este ilustrat procesul tranzitoriu prin care sistemul (4.2-12) ajunge din starea inițială în starea corespunzătoare MPP. Se observă că în final s-au obținut pentru MPP valorile:  $I_{MPP}=0.37$  A,  $V_{MPP}=8.66$  V și  $P_{MPP}=3.21$  W.

Fig. 4.2-4. *Determinare MPP - Scenariul 1: variațiile curenților  $I$ , tensiunii  $V$  și puterii  $P$*

*Determinare MPP – Scenariul 2:  $V(0)=10\text{ V}$  și  $I(0)=0.4\text{ A}$*

- Valorile inițiale corespund unui punct din afara caracteristici  $I(V)$ .

Rezultatele sunt redată în Fig. 4.2-5. Așa cum era de așteptat, pentru MPP obținute au fost aceleași rezultate ca și în cazul *Scenariului 1*:  $I_{MPP}=0.37\text{ A}$ ,  $V_{MPP}=8.66\text{ V}$  și  $P_{MPP}=3.21\text{ W}$ .

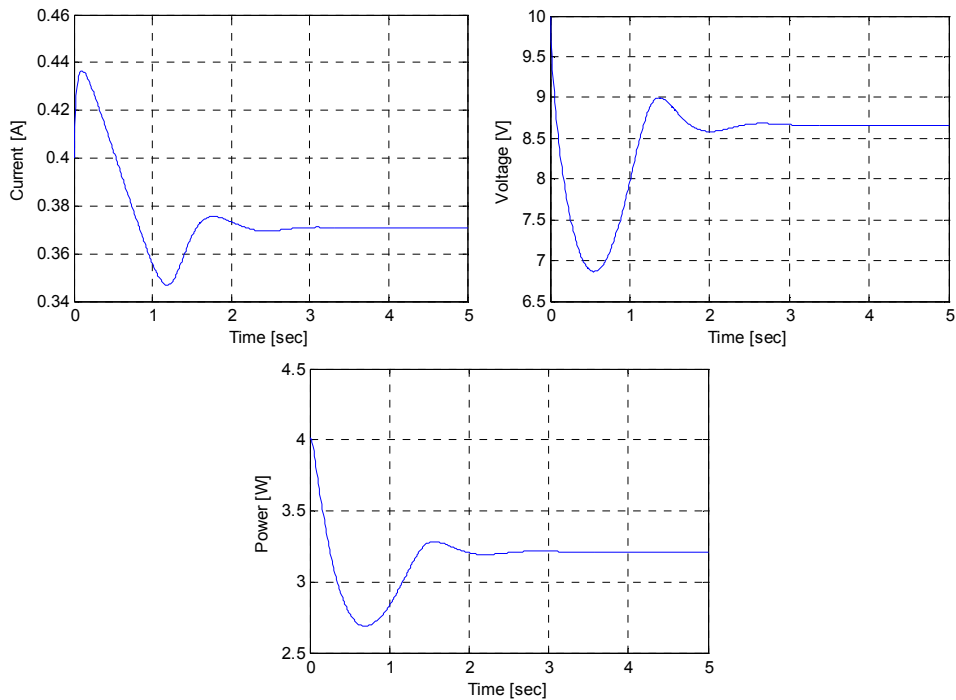


Fig. 4.2-5. *Determinare MPP - Scenariul 2: variațiile curentului  $I$ , tensiunii  $V$  și puterii  $P$*

Avantajul acestei metode constă în faptul că, în măsura în care modelul caracteristicii externe a diodei este bine determinat, MPP se poate determina cu foarte bună precizie. Dezavantajul metodei constă în faptul că MPP se determină pentru o singură caracteristică  $I(V)/P(V)$ .

#### 4.2.1.4. Determinarea MPP pentru M-E1

Rescriind modelul (2.3-1) sub forma :

$$\frac{I_{sc} - I}{I_{sat}} = e^{\frac{V + I \cdot R_{Se}}{V_T}}, \quad (4.2-17)$$

expresia lui  $V$  se poate explicita ca funcție de  $I$  sub forma:

$$V = V_T \cdot \ln\left(\frac{I_{sc} - I}{I_{sat}}\right) - I \cdot R_{Se}, \quad (4.2-18)$$

iar a lui  $P$  sub forma:

$$P = I \cdot V_T \cdot \ln\left(\frac{I_{SC} - I}{I_{sat}}\right) - I^2 \cdot R_{Se}. \quad (4.2-19)$$

Rezultă că maximumul lui  $P$ , se obține pentru  $I_{MPP}$  determinat ca soluție a ecuației

$$I_{MPP} \cdot \left(\frac{1}{I_{SC} - I_{MPP}} - \frac{2R_{Se}}{V_T}\right) = \ln \frac{I_{sat} - I_{MPP}}{I_{sat}},$$

iar prin înlocuirea acestui rezultat în (4.2-17) și (4.2-18) se obțin valorile lui  $V_{MPP}$  și  $P_{MPP}$ .

#### 4.2.1.5. Determinarea MPP pentru M-E2

În cazul M-E2, de expresie (2.3-2), folosind (4.2-1) rezultă:

$$P = I \cdot V_{OC} \cdot \left[1 + \frac{1}{b} \cdot \ln \frac{I_{SC} - I}{I_{SC}}\right] - R_{Se} \cdot I^2. \quad (4.2-20)$$

Ca urmare, maximumul lui  $P$  se obține pentru  $I_{MPP}$  determinat ca soluție a ecuației

$$I_{MPP} \cdot \left(\frac{1}{I_{SC} - I_{MPP}} + \frac{2R_{Se}b}{V_{OC}}\right) = b + \ln \frac{I_{SC} - I_{MPP}}{I_{SC}}$$

etc.

#### 4.2.1.6. Determinarea MPP pentru M-E3

Din modelul (2.3-3) și din (4.2-1) deducem o dependență  $P(V)$  de forma:

$$P = I_{SC} \cdot \left(1 - \left(\frac{V}{V_{OC}}\right)^{k_e}\right) \cdot V, \quad (4.2-21)$$

respectiv formulele

$$V_{MPP} = \frac{V_{OC}}{(1 + k_e)^{\frac{1}{k_e}}}, \quad I_{MPP} = \frac{k_e}{1 + k_e} \cdot I_{SC}, \quad P_{MPP} = V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot \frac{k_e}{(1 + k_e)^{\frac{1}{k_e} + 1}}.$$

### 4.2.2. Determinarea MPP în contextul unor structuri de tip sisteme de reglare extremale

Datorită alurii caracteristicii  $P(V)$  cele mai utilizate structuri de reglare folosite în prezent pentru controlul panourilor fotovoltaice sunt cele cunoscute sub denumirea de sisteme de reglare extremale [Călin 1976], [Dumitrache 1980], [Călin 1985]. În domeniul panourilor fotovoltaice ele apar sub diferite denumiri care încearcă să redea din perspective diverse principiul de căutare a punctului de extrem. Astfel, metoda „Perturbă și Observă” și metoda “Conductanță incrementală” la care ne referim în continuare corespund în esență metodelor folosite, respectiv, în „sistemele extremale pas cu pas” și în „sistemele extremale cu controlul derivatei”. Fiecare dintre aceste sisteme asigurând funcționarea sistemului în vecinătatea punctului de putere maximă al sursei de energie, în cazul de față al panoului fotovoltaic, oferă, implicit, posibilitatea de determinare automată, cu aproximație, a MPP fără a utiliza un model matematic al panoului fotovoltaic. Astfel, procesul de

conducere din astfel de sisteme poate fi folosit și pentru determinarea și memorarea online, prin citirea și prelucrarea valorilor  $V_{PV\_P}$  și  $I_{PV\_P}$  în cursul funcționării normale a sistemului, a unei mulțimi de MPP care poate fi relaționată apoi cu condițiile de mediu și/sau cu orientarea panoului. Ideea este ilustrată în Fig. 4.2-6 în care pentru exemplificare s-a considerat un sistem de căutare a MPP (i.e. strategie MPPT) prezentat în [Gules 2008]. Structura de reglare s-a completat cu un bloc de memorare care, pe baza unei logici de determinare a valorilor de maximum ale  $P_{MPP}$ , memorează tripletul  $(V_{MPP}, I_{MPP}, P_{MPP})$  și valorile  $\hat{\theta}$  și  $\hat{G}$ .

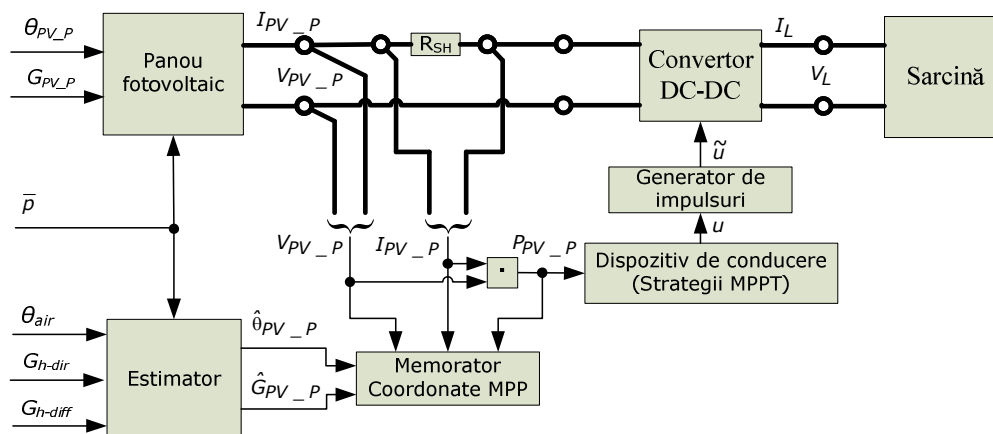


Fig. 4.2-6. Structură de conducere MPPT cu memorarea coordonatelor MPP

În vederea completării ideii de mai sus, în continuare se face o scurtă prezentare a celor două metode menționate:

*Metoda "Perturbă și Observă"* (Perturbe and Observe - P&O) [Lim 2000], [Gules 2008], [Petreuş 2009], [Chao 2010], [Teng 2010], [Petreuş 2010], [Rahim 2010], [Zainudin 2010], [Petreuş 2011] se bazează pe compararea permanentă a valorii curente a puterii măsurate la bornele panoului fotovoltaic ( $P_{PV\_P}(n)$ ) cu valoarea anterioară a puterii măsurate la bornele panoului fotovoltaic ( $P_{PV\_P}(n-1)$ ) și pe modificarea adecvată a punctului de funcționare al panoului fotovoltaic astfel încât funcționarea să se mențină la putere maximă. În lucrările referite mai sus, această cerință se realizează cu ajutorul unui convertor DC-DC prin modificarea factorului de umplere al semnalului de comandă ( $\tilde{u}$ ). În Fig. 4.2-7 sunt prezentați pașii metodei Perturbă și Observă. Măsurarea puterii presupunând măsurarea valorilor tensiunii  $V_{PV\_P}$  și curentului  $I_{PV\_P}$  rezultă că procesul de conducere poate fi folosit și pentru determinarea MPP.

$\Delta u$  este valoarea de incrementare/decrementare a factorului de umplere a convertorului. Desigur trebuie introdusă și o limitare a valorii factorului de umplere,  $\tilde{u} \in [0.10, 0.90]$ .

Un avantaj al acestei metode îl constituie simplitatea precum și posibilitatea de implementare pe o platformă cu microcontroler sau automat programabil cu performanțe reduse.

Principalul dezavantaj al acestei metode de reglare îl constituie răspunsul relativ lent la variația rapidă a factorilor de mediu.

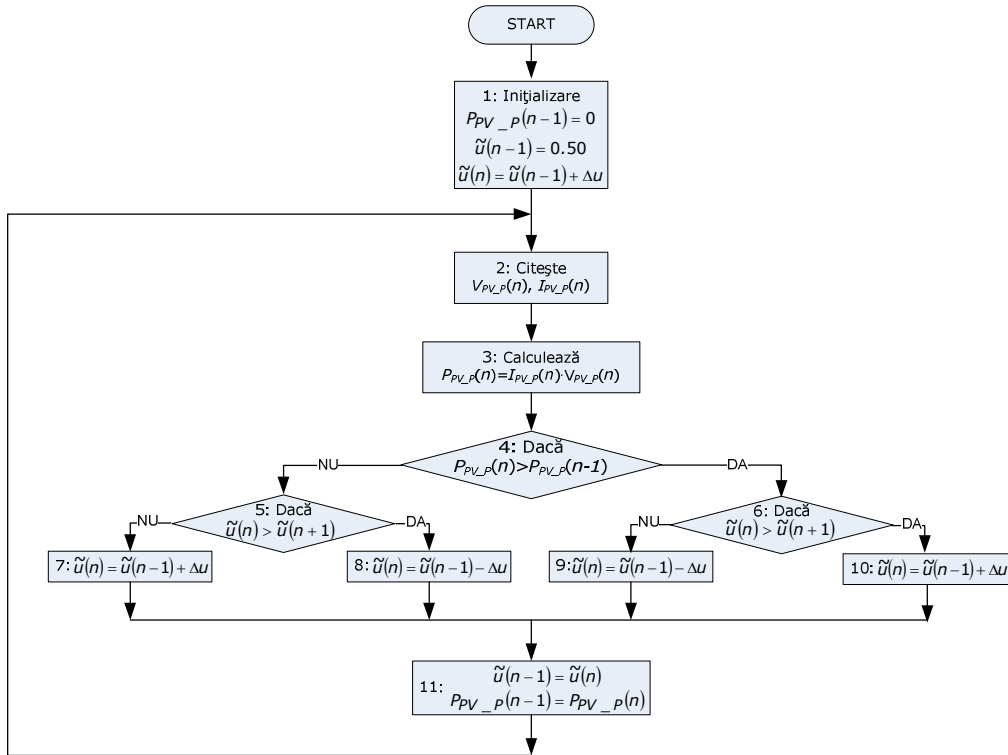


Fig. 4.2-7. Metoda Perturbă și Observă

- Metoda "Conductanță incrementală" (Incremental Conductance) utilizează pentru determinarea MPP, în plus față de P&O, derivata  $\frac{dP}{dV}$ . În cazul în care  $\frac{dP}{dV} > 0$  înseamnă că pentru atingerea MPP valoarea lui  $V$  trebuie crescută iar în cazul în care  $\frac{dP}{dV} < 0$ , valoarea lui  $V$  trebuie scăzută. Se consideră ca s-a atins MPP atunci când  $\frac{dP}{dV} \cong 0$  [Lim 2000], [Xiao 2004], [Tafticht 2008], [Chu 2009], [Zainudin 2010]. Și în acest caz măsurarea puterii fiind asociată cu măsurarea valorilor tensiunii  $V_{PV_P}$  și curentului  $I_{PV_P}$  rezultă că procesul de conducere poate fi folosit și pentru determinarea MPP.

Conform [Knopf 1999], prin metoda conductanței incrementale se poate obține 89.9% din puterea totală disponibilă, folosind Perturbă și Observă putem obține 81.5% din puterea totală disponibilă, iar dacă nu utilizăm nici o metodă de determinare a MPP putem obține doar 31.3% din puterea disponibilă.



### 4.3. Modele de tip interpolativ ale caracteristicilor $I_{MPP}(\theta, G)$ , $V_{MPP}(\theta, G)$ și $P_{MPP}(\theta, G)$

În funcționarea curentă caracteristica (1) din Fig. 4.2-3 și totodată valorile lui  $I_{MPP}$ ,  $V_{MPP}$  și  $P_{MPP}$  variază datorită variațiilor parametrilor externi  $\theta$  și  $G$ . În contextul precizat la începutul capitoului este importantă determinarea valorilor  $I_{MPP}$ ,  $V_{MPP}$  și  $P_{MPP}$  în funcție de  $\theta$  și  $G$  în vederea utilizării lor ca mărimi de referință pentru sistemele automate cu panouri fotovoltaice destinate să lucreze în vecinătatea MPP. Obiectivul poate fi atins măsurând pe  $\theta$  și  $G$  și folosind modele de tip interpolativ (blocuri de interpolare 2D) de forma:

$$I_{MPP} = f_1(\theta, G), V_{MPP} = f_2(\theta, G), P_{MPP} = f_3(\theta, G), \quad (4.3-1)$$

în care  $f_1$ ,  $f_2$  și  $f_3$  sunt funcții de interpolare (sau modele interpolative).

Principiul este ilustrat prin structura de principiu din Fig. 4.3-1. Schema este destinată menținerii punctului de funcționare al sistemului cu panou fotovoltaic în vecinătatea MPP folosind ca mărimi de referință pentru bucla de reglare care comandă convertorul coordonatele  $I_{MPP}$  și  $V_{MPP}$  ale MPP determinate cu un bloc interpolator. În cadrul buclei de reglare modificarea punctului de funcționare al panoului fotovoltaic se comandă prin modificarea valorii factorului de umplere al semnalului de comandă a convertorului DC-DC (problemă detaliată în subcapitolul 4.4).

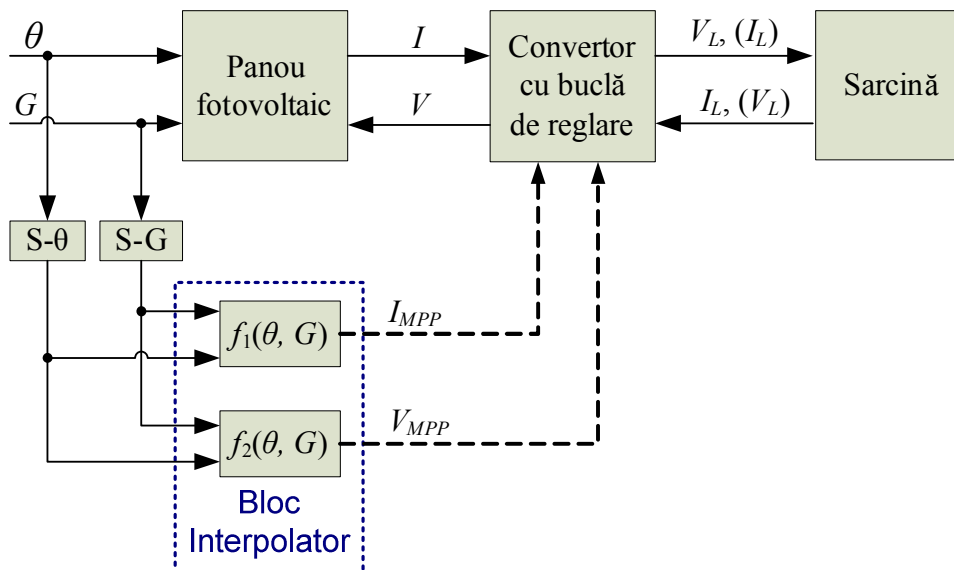


Fig. 4.3-1. Structură de principiu pentru determinarea și menținere funcționării sistemului cu panou fotovoltaic în vecinătatea MPP

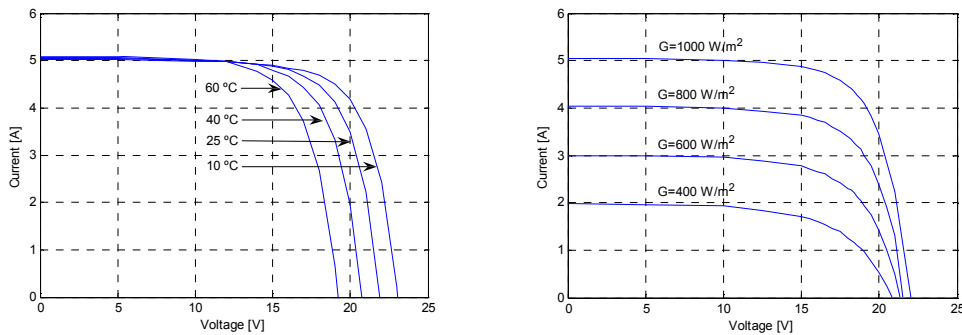
În schema de principiu valorile lui  $\theta$  și  $G$  sunt măsurate cu ajutorul senzorilor  $S-\theta$  și  $S-G$ . Situația este denumită „caz ideal”.

Ca punct de plecare pentru sinteza funcțiilor de interpolare se consideră ipoteza că dispunem de un set de caracteristici externe  $I(V)$  ale panoului fotovoltaic obținute experimental pentru diverse valori ale parametrilor  $\theta$  și  $G$ , și că am determinat în prealabil MPP pentru fiecare caracteristică (v. paragraful 4.2).

În paragraful 4.3.1 se prezintă prin intermediul unui exemplu o metoda de obținere a dependențelor (4.2-16). În paragraful 4.3.2 se tratează situația în care intensitatea radiației totale globale se măsoară indirect, cu ajutorul intensității radiației directe  $G_{h\_dir}$  și a intensității radiației difuze  $G_{h\_diff}$ . Această situație este denumită „caz real”. Pentru validarea modelelor interpolative din cazul ideal în paragraful 4.3.3 se folosesc caracteristici determinate externe determinate tot prin interpolare, folosind metoda Tsuno [Tsuno 2009].

#### 4.3.1. Metodă de obținere a modelelor interpolative $I_{MPP}(\theta, G)$ , $V_{MPP}(\theta, G)$ și $P_{MPP}(\theta, G)$

Metoda de obținere a funcțiilor de interpolare  $f_1(\theta, G)=I_{MPP}(\theta, G)$ ,  $f_2(\theta, G)=V_{MPP}(\theta, G)$  și  $f_3(\theta, G)=P_{MPP}(\theta, G)$  prezentată în acest paragraf se bazează pe studiul de caz publicat de autor în lucrarea [Dragomir 2010c]. Ca punct de plecare sau considerat caracteristicile experimentale din Fig. 4.3-2 preluate din lucrarea [Taftich 2008]. Numărul acestora se notează cu  $n_s$ . În cazul de față  $n_s = 7$ .



a)  $\theta = 10 \div 60$  °C,  $G = 1000$  W/m<sup>2</sup>

b)  $\theta = 25$  °C,  $G = 400 \div 1000$  W/m<sup>2</sup>

Fig. 4.3-2. Caracteristici  $I(V)$  pentru diferite valori ale temperaturii - a) și ale intensității radiației solare - b)

Etapile parcurse pentru obținerea modelelor (4.3-1) au fost următoarele:

- Etapa I:

*Determinarea celor 7 parametri ai modelului M-2D pentru fiecare dintre caracteristicile experimentale.*

În acest scop s-a folosit metoda bazată pe algoritmi genetici din paragraful 2.6. Astfel, pentru caracteristica din Fig. 4.3-2 de parametri  $\theta = 25^\circ\text{C}$ ,  $G = 1000$  W/m<sup>2</sup> s-au obținut:

$$\begin{aligned} V_{T1} &= 1.0148 \text{ V}; V_{T2} = 1.5269 \text{ V}; I_{O1} = 1.56 \cdot 10^{-9} \text{ A}; I_{O2} = 346.38 \cdot 10^{-9} \text{ A}; \\ R_S &= 0.1596 \Omega; R_P = 58.997 \Omega; I_{ph} = 5.0536 \text{ A} \end{aligned} \quad (4.3-2)$$

- Etapa II:

*Determinarea coordonatelor lui MPP pentru fiecare dintre modelele determinate în Etapa I.*

S-a folosit metoda din paragraful 4.2.1.3, respectiv schema Simulink din Fig. 4.2-2. În particular, pentru caracteristica cu parametrii (4.3-2) a rezultat  $I_{MPP} = 4.33$  A,  $V_{MPP} = 18.87$  V. Restul valorilor sunt sistematizate în Tabelul 4.3-1. Comparând aceste rezultate cu cele care pot fi extrase din caracteristicile  $P(V)$  redată în [Taftich 2008], probabil caracteristici determinate experimental, se

4.3 – Obținerea suprafețelor  $I_{MPP}(\theta, G)$ ,  $V_{MPP}(\theta, G)$  și  $P_{MPP}(\theta, G)$  prin interpolare 117

constată diferențe minore. Ca urmare putem aprecia că atât modelul M-2D cu parametrii determinați folosind algoritmi genetici cât și metoda de determinare a lui MPP sunt corecte.

**Tabelul 4.3-1:** Valori ale  $I_{MPP}$ ,  $V_{MPP}$ ,  $P_{MPP}$  determinate în cadrul etapei II pentru diferite valori ale  $\theta$  și  $G$

$\theta$ [°C] G [W/m <sup>2</sup> ]	10	25	40	60
400		1.58/16.25/25.72		
600		2.52/17.53/44.21		
800		3.46/18.25/64.15		
1000	4.34/19.74/85.72	4.31/18.87/81.15	4.26/17.89/76.12	4.21/16.43/69.05

$I_{MPP}$  [A]/ $V_{MPP}$  [V]/ $P_{MPP}$  [W]

- Etapa III:

Generarea modelelor de interpolare (4.3-1) pe baza datelor din tabelul 4.3-1.

Mai întâi se extrag din tabel pentru fiecare dintre cele 3 mărimi grilele carteziene corespunzătoare. Ele sunt incomplete având doar câte 7 puncte de sprijin de tipul  $I_{MPP}(\theta, G)$ ,  $V_{MPP}(\theta, G)$ ,  $P_{MPP}(\theta, G)$ . În Tabelul 4.3-2 este dată, ca exemplu, grila lui  $I_{MPP}$ .

**Tabelul 4.3-2:** Grila incompletă pentru  $I_{MPP}$

$\theta$ [°C] G [W/m <sup>2</sup> ]	10	25	40	60
400		1.58		
600		2.52		
800		3.46		
1000	4.34	4.31	4.26	4.20

$I_{MPP}$  [A]

În continuare, se completează grilele de interpolare extrase folosind metoda de interpolare Shepard. Ea a fost aleasă având în vedere atât trăsăturile foarte favorabile ale acestei metode, discutate în lucrarea [Drechsel 1996], cum este netezimea funcției de interpolare, cât și rezultatele favorabile obținute prin utilizarea ei ca metodă de interpolare globală în sinteza reguletoarelor de tip RIP:

Interpolarea Shepard furnizează valoarea de sprijin, în cazul de față valoarea lui  $I_{MPP}$ ,  $V_{MPP}$  sau  $P_{MPP}$ , pentru un punct de sprijin necompletat al grilei, în funcție de poziția acestui punct,  $(\theta, G)$ , în grilă și de toate celelalte  $n_s$  puncte de sprijin completate. Formula de interpolare este:

$$c = \left( \sum_{i=1}^{n_s} w_i \cdot c_i \right) / \left( \sum_{i=1}^{n_s} w_i \right), \quad w_i = \left[ \sqrt{(\theta - \theta_i)^2 + (G - G_i)^2} \right]^{-\mu} \quad (4.3-3)$$

În formulă  $c = I_{MPP}$ ,  $V_{MPP}$  sau  $P_{MPP}$  este valoarea de sprijin calculată pentru punctul de sprijin necompletat de coordonate  $(\theta, G)$ ,  $c_i$  este valoare de

sprijin cunoscută pentru punctul de sprijin completat de coordonate  $(\theta_i, G_i)$ , iar  $w_i$  este ponderea asociată punctului de sprijin completat. Ponderea  $w_i$  este invers proporțională cu puterea  $\mu$  a distanței dintre locurile de sprijin  $(\theta, G)$  și  $(\theta_i, G_i)$ . Prin aplicarea acestei formule pentru  $\mu=1.5$  s-au obținut grilele din Tabele 4.3-3, 4.3-4, 4.3-5.

**Tabelul 4.3-3:** Grila completă pentru  $I_{MPP}$

$\theta$ [°C] G[W/m <sup>2</sup> ]	10	25	40	60
400	1.66	1.58	1.66	1.84
600	2.57	2.52	2.57	2.68
800	3.49	3.46	3.49	3.55
1000	4.34	4.31	4.26	4.20

$I_{MPP}$  [A]

**Tabelul 4.3-4:** Grila completă pentru  $V_{MPP}$

$\theta$ [°C] G[W/m <sup>2</sup> ]	10	25	40	60
400	16.31	16.25	16.31	16.47
600	17.53	17.53	17.53	17.55
800	18.22	18.25	18.22	18.16
1000	19.74	18.87	17.89	16.43

$V_{MPP}$  [V]

**Tabelul 4.3-5:** Grila completă pentru  $P_{MPP}$

$\theta$ [°C] G[W/m <sup>2</sup> ]	10	25	40	60
400	27.13	25.72	27.13	30.25
600	45.13	44.21	45.13	47.03
800	64.65	64.15	64.65	64.54
1000	85.72	81.15	76.12	69.05

$P_{MPP}$ [W]

Numărul de 16 puncte ale acestor grile este redus. Fiecare din grile poate fi îndesită folosind tot interpolarea Shepard. Se ajunge astfel la grile cu mai multe puncte, cu o granularizare mai mare, cum sunt cele din Tabelul 4.3-6, Tabelul 4.3-7 și Tabelul 4.3-8 (reprezintă o extensie a celor din Tabelul 4.3-3, Tabelul 4.3-4 și Tabelul 4.3-5).

**Tabelul 4.3-6:** Grilă extinsă pentru  $I_{MPP}$

$\theta$ [°C] G[W/m <sup>2</sup> ]	10	20	25	30	40	50	60
400	1.66	1.59	1.58	1.60	1.66	1.75	1.84
600	2.57	2.53	2.52	2.53	2.57	2.63	2.68
800	3.49	3.46	3.46	3.47	3.49	3.52	3.55
1000	4.34	4.29	4.31	4.29	4.26	4.24	4.20

$I_{MPP}$  [A]

**Tabelul 4.3-7:** Grilă extinsă pentru  $V_{MPP}$ 

$\theta$ [°C] \ G[W/m <sup>2</sup> ]	10	20	25	30	40	50	60
400	16.31	16.26	16.25	16.26	16.31	16.39	16.47
600	17.53	17.53	17.53	17.53	17.53	17.54	17.55
800	18.22	18.24	18.25	18.24	18.22	18.19	18.16
1000	19.74	18.91	18.87	18.60	17.89	17.48	16.43

 $V_{MPP}$  [A]**Tabelul 4.3 -8:** Grilă extinsă pentru  $P_{MPP}$ 

$\theta$ [°C] \ G[W/m <sup>2</sup> ]	10	20	25	30	40	50	60
400	27.13	26.00	25.72	26.00	27.13	28.62	30.25
600	45.13	44.40	44.21	44.40	45.13	46.06	47.03
800	64.65	64.25	64.15	64.25	64.65	64.10	64.54
1000	85.72	81.34	81.15	79.74	76.12	74.04	69.05

 $P_{MPP}$  [A]

- Etapa IV:

Se determină forma finală a modelelor interpolative prin implementarea grilelor obținute la finalul Etapei III.

Pentru aceasta pot fi folosite diverse metode de interpolare. În Fig. 4.3-3 și Fig. 4.3-4 sunt ilustrate rezultate obținute folosind blocul Simulink Lookup Table. Sunt de remarcat netezimea suprafețelor  $I_{MPP}(\theta, G)$  și  $P_{MPP}(\theta, G)$  și faptul că la menținerea constantă a valorii unuia dintre cei doi parametri variațiile în raport cu al doilea parametru nu sunt strict monotone.

#### 4.3.2. Estimarea mărimilor de intrare ale modelelor interpolative (măsurarea indirectă a intensității radiației totale globale - cazul real)

În mod curent intensitatea radiației totale globale nu poate fi măsurată direct, ci indirect folosind estimatoare. O astfel de structură este ilustrată în Fig. 4.3-5. Schema folosește pentru estimarea valorilor lui  $\theta$  și  $G$  de la nivelul panoului fotovoltaic (notate cu  $\theta_{PV\_P}$  respectiv  $G_{PV\_P}$ ) un bloc estimator care are ca mărimi de intrare, toate măsurabile, poziția panoului în raport cu poziția soarelui  $\bar{p}$ , temperatura ambiantă  $\theta_{air}$ , intensitatea radiației directe  $G_{h\_dir}$  și intensitatea radiației difuze  $G_{h\_diff}$ . Mărimile de ieșire,  $\hat{\theta}_{PV\_P}$  și  $\hat{G}_{PV\_P}$  furnizează estimatele mărimilor  $\theta_{PV\_P}$  și  $G_{PV\_P}$ .

Poziția panoului față de soare,  $\bar{p}$ , se obține prin calcul din poziția curentă a panoului (Latitudine, Longitudine, Altitudine, înclinație) și din timpul curent (an, lună, zi, oră, minut, secundă). Maniera în care estimatorul furnizează valoarea intensității radiației totale de la nivelul panoului,  $\hat{G}_{PV\_P}$ , din valorile mărimilor  $\bar{p}$ ,  $G_{h\_dir}$  și  $G_{h\_diff}$  este prezentat în Anexa 4.1.

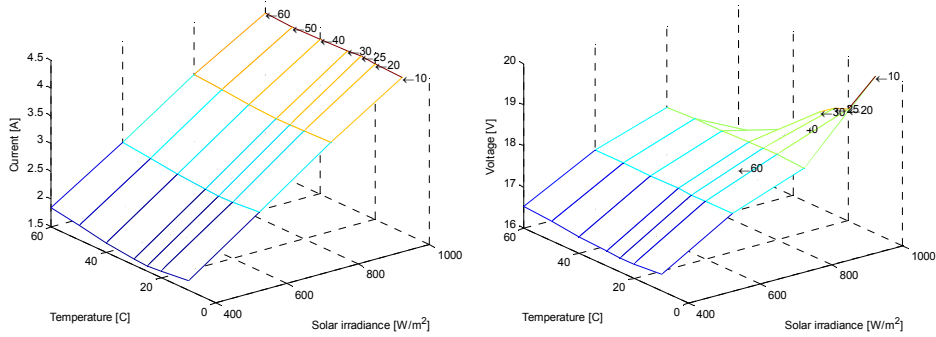


Fig. 4.3-3. Rezultatele obținute folosind Simulink - Lookup Table pentru  $I_{MPP} = f_1(\theta, G)$  și  $V_{MPP} = f_2(\theta, G)$

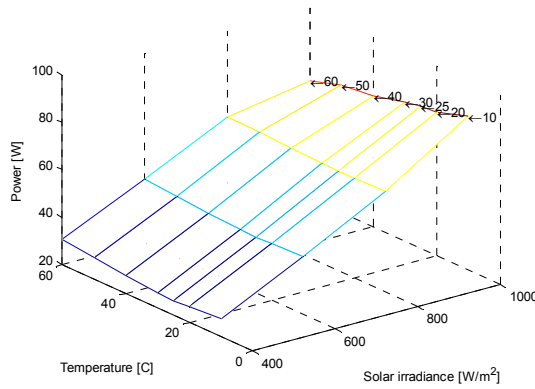


Fig. 4.3-4. Rezultatele obținute folosind Simulink - Lookup Table pentru  $P_{MPP} = f_3(\theta, G)$

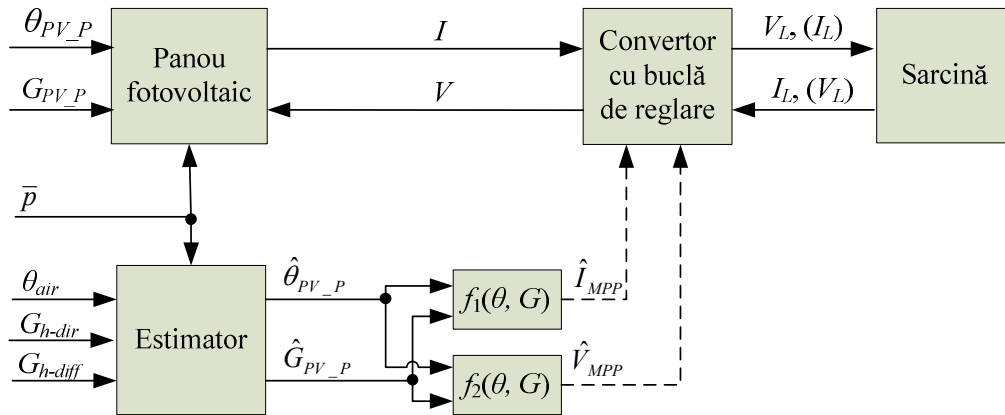


Fig. 4.3.5. Structură de principiu pentru determinarea și menținere MPP pe baza măsurării mărimilor  $\theta_{air}$ ,  $G_{h-dif}$ ,  $G_{h-dir}$  și  $\bar{p}$

#### 4.3.3. Verificarea funcțiilor de interpolare $I_{MPP}(\theta, G)$ , $V_{MPP}(\theta, G)$ și $P_{MPP}(\theta, G)$ obținute prin metoda de la punctul 4.3.1 folosind caracteristicile determinate prin metoda Tsuno

Ulterior realizării studiului prezentat în paragrafele anterioare a fost publicată metoda de interpolare-extrapolare detaliată în subcapitolul 2.4, numită în continuare "Metoda Tsuno" [Tsuno 2009]. Pe baza ei am dezvoltat aplicația Matlab-Simulink prezentată în Anexa 4.2. capabilă să determine prin interpolare caracteristici  $I(V)$  dorite plecând de la 4 caracteristici  $I(V)$  determinate experimental. Aplicația a fost folosită pentru evaluarea suprafețelor  $I_{MPP}(\theta, G)$ ,  $V_{MPP}(\theta, G)$  și  $P_{MPP}(\theta, G)$  obținute prin metoda de la punctul 4.3.1, prin determinarea caracteristicilor MPP omoloage celor din tabelele 4.3-3, 4.3-4 și 4.3-5.

Pentru studiul am considerat cunoscute patru caracteristici, notate cu (1), (2), (3) și (4), având următorii parametri:

(1): ( $\theta_1 = 10^\circ \text{C}$ ,  $G_1 = 1000 \text{ W/m}^2$ ), (2): ( $\theta_2 = 60^\circ \text{C}$ ,  $G_1 = 1000 \text{ W/m}^2$ ),

(3): ( $\theta_3 = 10^\circ \text{C}$ ,  $G_3 = 600 \text{ W/m}^2$ ), (4): ( $\theta_4 = 25^\circ \text{C}$ ,  $G_3 = 600 \text{ W/m}^2$ ).

Conform Anexei 4.2, o caracteristică externă dorită  $I(V)$ , de parametri ( $\theta_x$ ,  $G_x$ ), se obține parcurgând 3 etape:

- *Etapa 1:* se determină din caracteristicile (1) și (2), prin interpolare, caracteristica (5) - trasată cu roșu în Fig. 4.3-6. Caracteristica corespunde temperaturii dorite  $\theta_x$  și intensității radiației solare  $G_1$ .
- *Etapa 2:* se determină din caracteristicile (3) și (4), prin interpolare, caracteristica (6) - trasată cu roșu în Fig. 4.3-7. Caracteristica corespunde temperaturii dorite  $\theta_x$  și intensității radiației solare  $G_3$ .

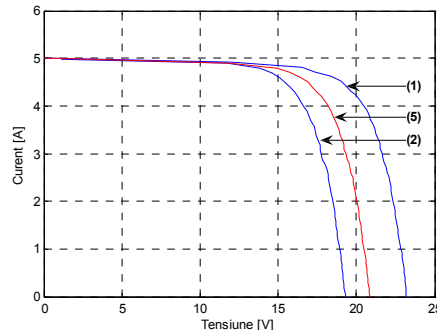


Fig. 4.3-6. Obținerea caracteristicii (5) prin interpolare folosind caracteristicile (1) și (2)

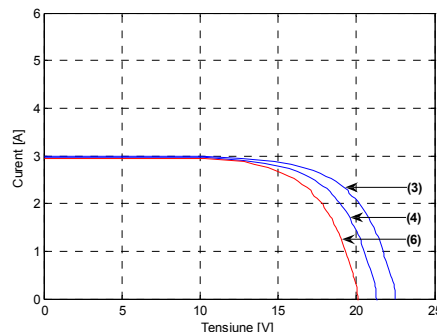


Fig. 4.3-7. Obținerea caracteristicii (6) prin interpolare folosind caracteristicile (3) și (4)

- *Etapa 3:* se determină din caracteristicile (5) și (6), prin interpolare, caracteristica (7) - trasată cu roșu în Fig. 4.3-8. Caracteristica corespunde atât temperaturii dorite  $\theta_x$  cât și intensității radiației solare dorite  $G_x$ .

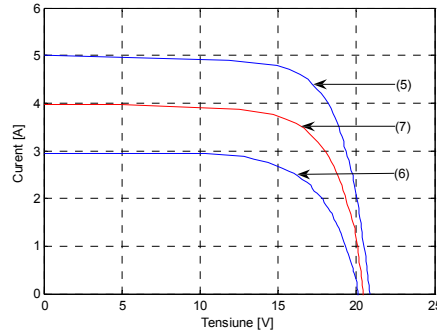


Fig. 4.3-8. Obținerea caracteristicii (7) prin interpolare folosind caracteristicile (5) și (6)

În tabelele 4.3-9, 4.3-10 și 4.3-11 sunt prezentate coordonatele și puterea corespunzătoare MPP obținute cu ajutorul metodei Tsuno plecând de la caracteristicile (1) – (4). Pentru parametri  $\theta_x$  și  $G_x$  s-au considerat aceleași perechi de valori ca și pentru tabelele 4.3-3, 4.3-4 și 4.3-5 din paragraful anterior. Pentru a simplifica comparația dintre valorile coordonatelor MPP obținute prin metoda Tsuno și cele obținute prin metoda Shepard, cele obținute cu metoda din paragraful anterior (Shepard) sunt trecute între paranteze.

**Tabelul 4.3-9:** Grila completă pentru  $I_{MPP}$  prin metoda Tsuno și prin metoda din paragraful 4.3.1

$\theta$ [°C] $G$ [W/m <sup>2</sup> ]	10	25	40	60
400	1.69 (1.66)	1.85 (1.58)	1.81 (1.66)	1.76 (1.84)
600	2.60 (2.57)	2.57 (2.52)	2.58 (2.57)	2.84 (2.68)
800	3.51 (3.49)	3.49 (3.46)	3.49 (3.49)	3.55 (3.55)
1000	4.52 (4.34)	4.51 (4.31)	4.50 (4.26)	4.49 (4.20)

$I_{MPP}$  [A]

**Tabelul 4.3-10:** Grila completă pentru  $V_{MPP}$  prin metoda Tsuno și prin metoda din paragraful 4.3.1

$\theta$ [°C] $G$ [W/m <sup>2</sup> ]	10	25	40	60
400	17.12 (16.31)	14.53 (16.25)	13.95 (16.31)	13.19 (16.47)
600	17.93 (17.53)	16.91 (17.53)	15.70 (17.53)	12.92 (17.55)
800	18.75 (18.22)	17.69 (18.25)	16.54 (18.22)	14.81 (18.16)
1000	19.01 (19.74)	17.95 (18.87)	16.88 (17.89)	15.47 (16.43)

$V_{MPP}$  [V]



**Tabelul 4.3-11:** Grila completă pentru  $P_{MPP}$  prin metoda Tsuno și prin metoda din paragraful 4.3.1

$\theta$ [°C] $G$ [W/m <sup>2</sup> ]	10	25	40	60
400	28.91 (27.13)	26.86 (25.72)	25.23 (27.13)	23.14 (30.25)
600	46.60 (45.13)	43.45 (44.21)	40.51 (45.13)	36.69 (47.03)
800	65.79 (64.65)	61.74 (64.15)	57.75 (64.65)	52.52 (64.54)
1000	85.89 (85.72)	80.94 (81.15)	76.01 (76.12)	69.47 (69.05)

$P_{MPP}$ [W]

Cu roșu sunt marcate coordonatele MPP ale celor 4 caracteristici considerate cunoscute iar cu negru cele calculate din caracteristicile obținute prin interpolare.

Fiecare dintre caracteristicile obținute prin interpolare a fost reprezentată prin 51 de puncte iar coordonatele MPP, s-au obținut calculând valorile puterii, ca produs dintre tensiune și curent, în toate cele 51 de puncte și selectând apoi punctele de putere maximă. Folosind această metodă obținem practic cel mai apropiat punct de MPP dintre cele 51 de puncte.

Inspectând rezultatele obținute se observă existența unor diferențe atât între valorile obținute cât și în ceea ce privește monotonia variației coordonatelor MPP în raport cu cei doi parametri. Situația se datorează, în principal, următoarelor aspecte:

- i) Ambele metode sunt afectate de erori cauzate de precizia extragerii coordonatelor punctelor din caracteristicile cunoscute, numărului punctelor luate în considerare pentru reprezentarea caracteristicilor cunoscute și de distribuția acestor puncte.
- ii) Nici una dintre metodele de interpolare nu are o argumentare riguroasă analitică, deficiență asumată în cazul metodelor de interpolare cu aplicabilitate largă.
- iii) Modelele conceptuale de tip scheme electrice reprezintă modele de aproximare.

În contextul celei de a doua observații considerăm că diferențele dintre rezultatele obținute prin cele două metode ar putea fi reduse prin considerarea în

formula de interpolare  $c = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} w_i \cdot c_i}{\sum_{i=1}^{n_s} w_i}$  din (4.3-3) a altor moduri de calcul

a ponderilor  $w_i$ , indicate în [Drechsel 1996]. Nu este lipsită de interes considerarea unor ponderi normate, prin raportarea lui  $\theta$  și  $G$  la valori nominale  $\theta_n$  și  $G_n$  ale

panoului fotovoltaic, i.e.  $w_i = \left[ \sqrt{\left( \frac{\theta}{\theta_n} - \frac{\theta_i}{\theta_n} \right)^2 + \left( \frac{G}{G_n} - \frac{G_i}{G_n} \right)^2} \right]^{-\mu}$ .

#### 4.4. Studiul comportării unor sisteme de conducere cu mărimi de referință generate prin interpolare

În acest paragraf, cu titlu de studiu de caz, se analizează, pe bază de modele matematice, comportarea a două sisteme care corespund structurii de principiu din Fig. 4.3-1. Modelele panoului voltaic, estimatorului și ale blocurilor de interpolare au fost prezentate în capitolul 2 paragrafe anterioare din acest capitol. În consecință mai trebuie detaliat blocul "Convertor și buclă de reglare". Din punct de vedere practic prezintă interes 3 tipuri de convertoare DC-DC: Buck ( $\rho < 1$ ) și Boost ( $\rho > 1$ ) și combinația Buck-Boost a acestora [Walker 2004], [Drăgan 2007], [Agorreta 2009], [Lo 2009], [Salhi 2009] [Brea 2010], [Ilango 2010], [Kalirasu 2010], [Mahdi 2010], [Masri 2010], [Park 2010], [Rahim 2010], [Zainudin 2010]. Studiul se referă numai la primele două tipuri de convertoare. În paragraful 4.4-1 este prezentat convertorul Buck iar în paragraful 4.4-2 convertorul Boost. Bucla de reglare este detaliată în 4.4-3. Validare se face, prin simularea a două experimente.

##### 4.4.1. Convertorul Buck

Acest tip de convertor se folosește atunci când se dorește ca raportul dintre tensiunea de ieșire și tensiunea de intrare să fie subunitar ( $\rho < 1$ ). Schema electrică de principiu a convertorului Buck este prezentată în Fig. 4.4-1.

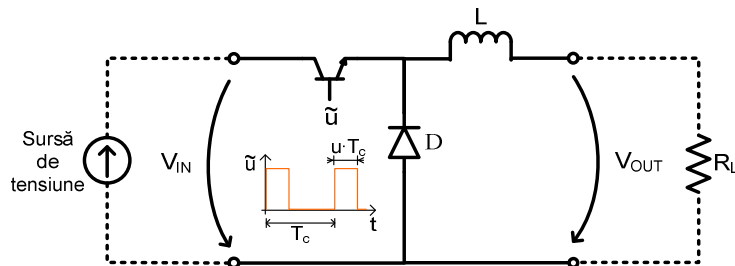


Fig. 4.4-1 Schemă electrică de principiu cu convertor Buck alimentat de la o sursă de tensiune

Schema corespunde cazului când convertorul se alimentează de la o sursă ideală de tensiune, la tensiunea  $V_{IN}(t)$ , iar convertorul alimentează o sarcină (în cazul de față un rezistor de rezistență  $R_L$ ), la tensiunea  $V_{OUT}(t)$ . Din punct de vedere sistemic convertorul poate fi privit ca un sistem cu orientarea  $u \rightarrow V_{OUT}$ , semnalul de intrare  $u$ , cu semnificația de factor de umplere, fiind aplicat prin intermediul tensiunii  $\tilde{u}$  în formă de impulsuri cu frecvență constantă. Regimul permanent de funcționare al schemei este un regim periodic, caracterizat prin faptul că între valoarea medie  $\bar{V}_{IN}$  a tensiunii  $V_{IN}$  și valoarea medie  $\bar{V}_{OUT}$  a tensiunii  $V_{OUT}$  are loc relația [Truntic 2011]:

$$\bar{V}_{OUT} = u \cdot \bar{V}_{IN} . \quad (4.4-1)$$

În cazul în care convertorul este alimentat de la un PV\_P se folosește schema din Fig. 4.4-2 [Walker 2004], [Agorreta 2009], [Femia 2009], [Brea 2010], [Zainudin 2010]. Conform [\*\*\*,2008] panoul fotovoltaic poate fi considerat o sursă de curent care generează curentul  $I_{PV\_P}(t)$ . Tensiunea de alimentare  $V_{IN}(t)$  a convertorului DC-DC se culege de la bornele condensatorului  $C_2$ .

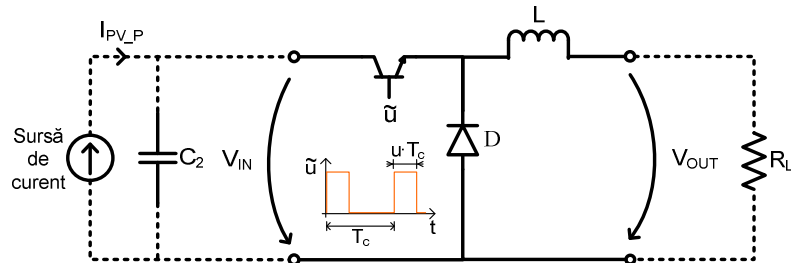


Fig. 4.4-2. Schemă de principiu a alimentării convertorului Buck de la un generator de curent

Prin intermediul semnalului de comandă pot fi implementate diferite strategii de conducere a sistemelor deservite de convertoare, în particular strategii de reglare pentru obținerea punctului de putere maximă. Aceasta este perspectiva din care vom aborda problema conectării unui panou fotovoltaic la un convertor DC-DC. Astfel, în lucrarea [Korodi 2011], autorul tezei dezvoltă un sistem de determinare și urmărire a punctului de putere maximă pentru un panou fotovoltaic care alimentează o sarcină rezistivă folosind un convertor Buck cu schema din Fig. 4.4-3. Față de convertorul Buck clasic din Fig. 4.4-1 apare grupul  $R_C - C_1$  folosit pentru netezirea variațiilor tensiunii  $V_{OUT}(t)$ .

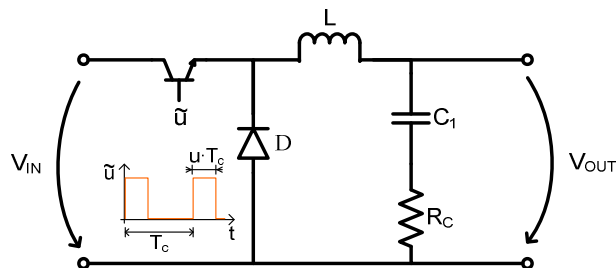


Fig. 4.4-3. Schemă electrică de convertor Buck cu element de netezire

Întreaga structură panou-converter Buck-consumator este prezentată în Fig. 4.4-4.

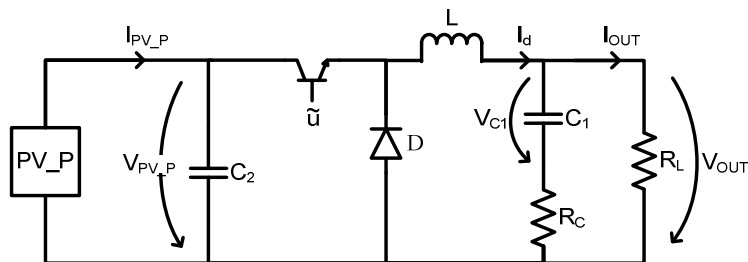


Fig. 4.4-4. Schemă de alimentare de la un panou fotovoltaic a unui consumator, prin intermediul unui convertor Buck

În ipoteza folosirii pentru panoul fotovoltaic a unuia dintre modelele considerate în paragraful 2.3 și în cazul unei sarcini rezistive, ca în Fig. 4.4-4, conexiunea poate fi privită ca un sistem dinamic, de ordinul 3, neliniar și variant în timp, varianța datorându-se modificării permanente a caracteristicii externe

$I_{PV\_P}(V_{PV\_P})$  a panoului în funcție de nivelul de iluminare și de temperatura mediului exterior.

Sistemul are ca *mărimi de intrare* factorului de umplere  $u$  al procesului de comutație, având ca purtător de informație semnalul de comandă  $\tilde{u}$  (de amplitudine  $\tilde{u}_0$ ), precum și nivelul de iluminare și temperatura mediului exterior care determină caracteristica externă  $I_{PV\_P}(V_{PV\_P})$  pe care lucrează la un moment dat panoul.

Ca *mărimi de ieșire* se consideră:

- $I_{PV\_P}(t)$  - curentul de la bornele panoului fotovoltaic,
  - $V_{OUT}(t)$  - tensiunea de la ieșirea convertorului DC-DC, respectiv de la bornele consumatorului (rezistorul  $R_L$  în cazul particular din Fig. 4.4-4);  
 $I_{OUT}(t)$  - curentul prin consumatorul legat la ieșirea convertorului DC-DC;
- Mărimile de stare* ale sistemului sunt:
- $V_{PV\_P}(t)$  - tensiunea de pe condensatorul  $C_2$  (tensiunea de la intrarea convertorului DC-DC corespunzătoare  $I_{PV\_P}(t)$ ),  $V_{PV\_P}(t) = V_{IN}(t)$ .
  - $I_d(t)$  - curentul prin inductanța  $L$ ,
  - $V_{C1}(t)$  - tensiunea pe condensatorul  $C_1$ .

Modelul matematic intrare-stare-ieșire al acestui sistem are ecuațiile de stare (4.4-2) și ecuațiile de ieșire (4.4-3).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dV_{PV\_P}(t)}{dt} = \frac{1}{C_2} \cdot I_{PV\_P}(V_{PV\_P}(t)) - \frac{1}{C_2} \cdot I_d(t) \\ \frac{dI_d(t)}{dt} = \beta \cdot \left[ \frac{\tilde{u}(t)}{\tilde{u}_0} \cdot \frac{1}{L} \cdot V_{PV\_P}(t) - \frac{1}{L} \cdot \frac{R_L \cdot R_C}{R_L + R_C} \cdot I_d(t) - \frac{1}{L} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_C} \cdot V_{C1}(t) \right] \\ \beta = \sigma \{ [\sigma(\Sigma + \varepsilon) + \sigma(I_d + \varepsilon)] - \varepsilon \} \\ \frac{dV_{C1}(t)}{dt} = \frac{1}{C_1} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_C} \cdot I_d(t) - \frac{1}{C_1} \cdot \frac{1}{R_L + R_C} \cdot V_{C1}(t) \end{array} \right. \quad (4.4-2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{PV\_P}(t) = I_{PV\_P}(V_{PV\_P}(t)) \\ I_{OUT}(t) = \frac{R_C}{R_L + R_C} \cdot I_d(t) + \frac{1}{R_L + R_C} \cdot V_{C1}(t) \\ V_{OUT}(t) = \frac{R_L \cdot R_C}{R_L + R_C} \cdot I_d(t) + \frac{R_L}{R_L + R_C} \cdot V_{C1}(t) \end{array} \right. \quad (4.4-3)$$

$\sigma(\cdot)$  - reprezintă semnalul treaptă unitate.

În (4.4-2) relația  $\beta = \sigma \{ [\sigma(\Sigma + \varepsilon) + \sigma(I_d + \varepsilon)] - \varepsilon \}$  înlocuiește relația ideală  $\beta = \sigma \{ [\sigma(\Sigma) + \sigma(I_d)] \}$ . Parametrul de prag  $\varepsilon$  este necesar pentru evitarea în cazul folosirii modelului în simulări a efectului de oscilații de calcul numeric.

Pentru validarea acestui model matematic a fost realizat modelul Simulink din Fig. 4.4-5 în care modelul matematic (4.4-2)-(4.4-3) este integrat în blocul „Subsistem MM-ISI Buck” și blocul Interpolator 3d care implementează panoul prin intermediul familiei de caracteristici externe  $I_{PV\_P}(V_{PV\_P})$ . Comutatorul de la intrarea blocului „Subsistem MM-ISI Buck” permite comutarea intrării convertorului și la un generator ideal de curent constant (spre deosebire de schema din Fig. 4.4-4)

realizând o structură utilă investigării comportării convertorului. În acest de-al doilea caz prima ecuație din (4.4-2) se modifică, luând forma:

$$\frac{dV_{PV\_P}(t)}{dt} = \frac{1}{C_2} \cdot I_{PV\_P}(t) - \frac{1}{C_2} \cdot I_d(t) \quad (4.4-4)$$

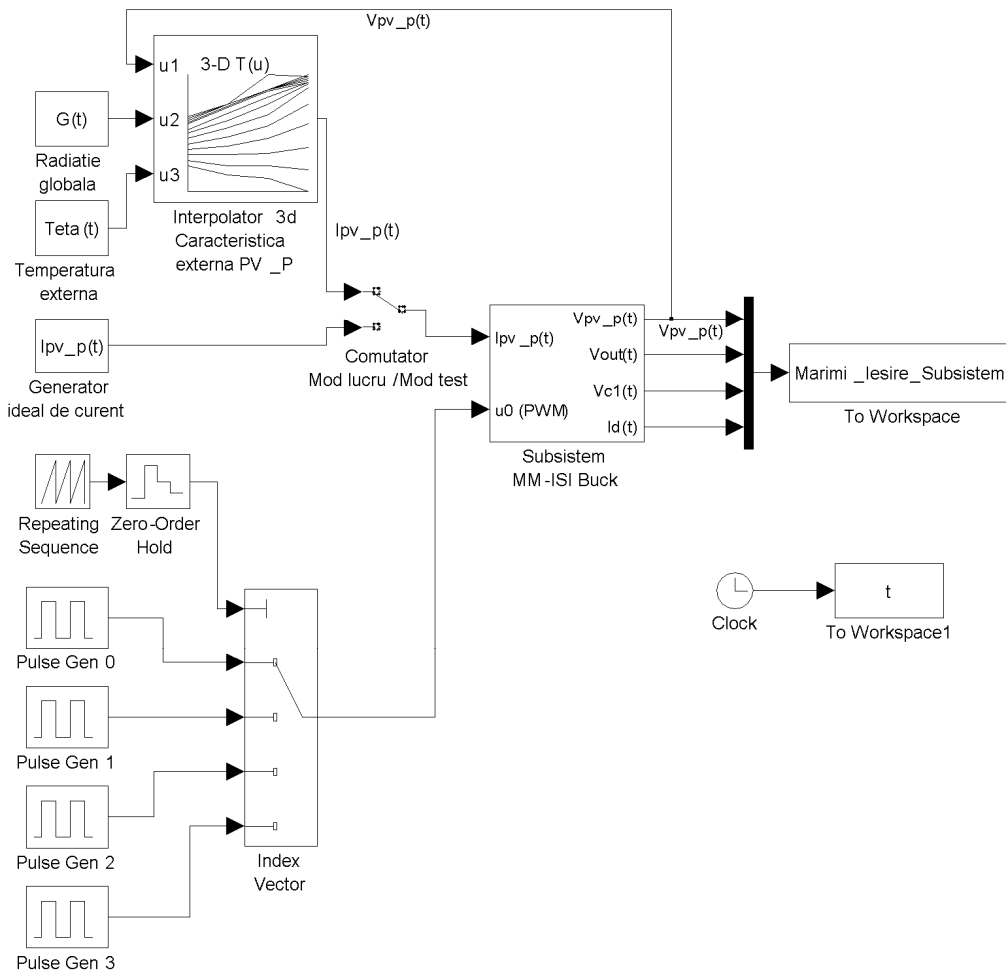
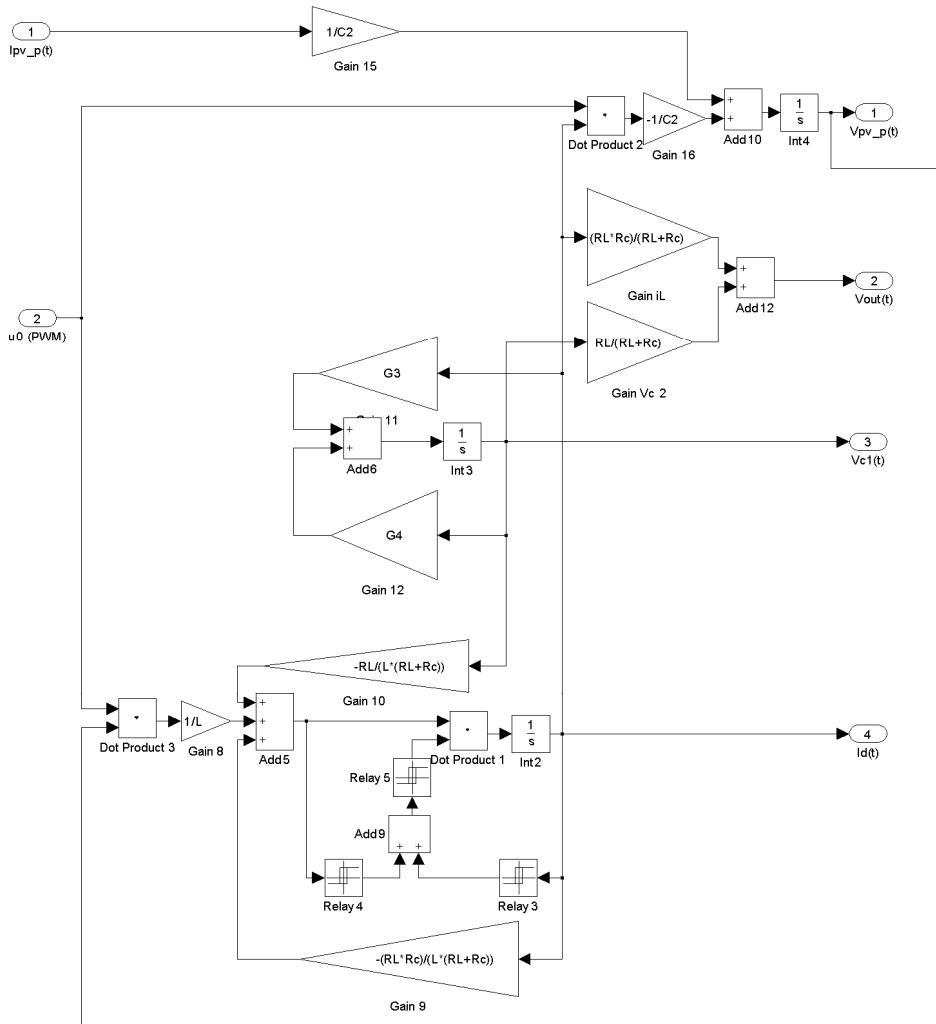


Fig. 4.4-5. Schemă Simulink de testare a MM-ISI al sistemului PV\_P - Convertor Buck - Consumator prezentat în Fig. 4.4-4 (schema Testare 1)

Subsistemul MM-ISI Buck din Fig. 4.4-5 este detaliat în Fig. 4.4-6. Amplificările  $G_3$  respectiv  $G_4$  au expresiile  $G_3 = R_L / (C_1 * (R_L + R_C))$ ;  $G_4 = -1 / (C_1 * (R_L + R_C))$ . Valorile parametrilor convertorului sunt:  $L=0.4$  mH,  $C_1 = 470$   $\mu$ F,  $R_C = 0.1$   $\Omega$ , și  $C_2 = 470$   $\mu$ F. S-a considerat o sarcină  $R_L = 2$   $\Omega$ .

Fig. 4.4-6 Modelul Simulink corespunzător *MM-ISI convertor Buck*

Validarea s-a realizat prin două scenarii corespunzătoare punerii comutatorului Mod lucru / Mod test în cele două poziții și aplicării de fiecare dată a unui semnal de comandă  $\tilde{u}(t)$  ca în Fig. 4.4-7, adică cu:

- durată totală de aplicare de 1 secundă;
- impulsuri cu perioadă fixă  $T_C = 50 \mu s$  (frecvență fixă 20 KHz) și cu factor de umplere  $u$  variabil, luând valorile: 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 și din nou 0.2 pe subintervale de timp de 0.2 secunde.

Cele 4 valori ale factorul de umplere sunt obținute cu blocul *Pulse Gen* (*Pulse Gen 0-0,2*, *Pulse Gen 1-0,4*, *Pulse Gen 2-0,6*, *Pulse Gen 3-0,8*). Comutarea între blocurile *Pulse Gen* se realizează cu ajutorul blocului *Index Vector* la fiecare 0.2 secunde. Comanda blocului *Index Vector* se realizează prin intermediul unui semnal *dinte de fierăstrău* de amplitudine 4 (între 0 și 4), discretizat cu pasul  $h=0,2$  sec.).

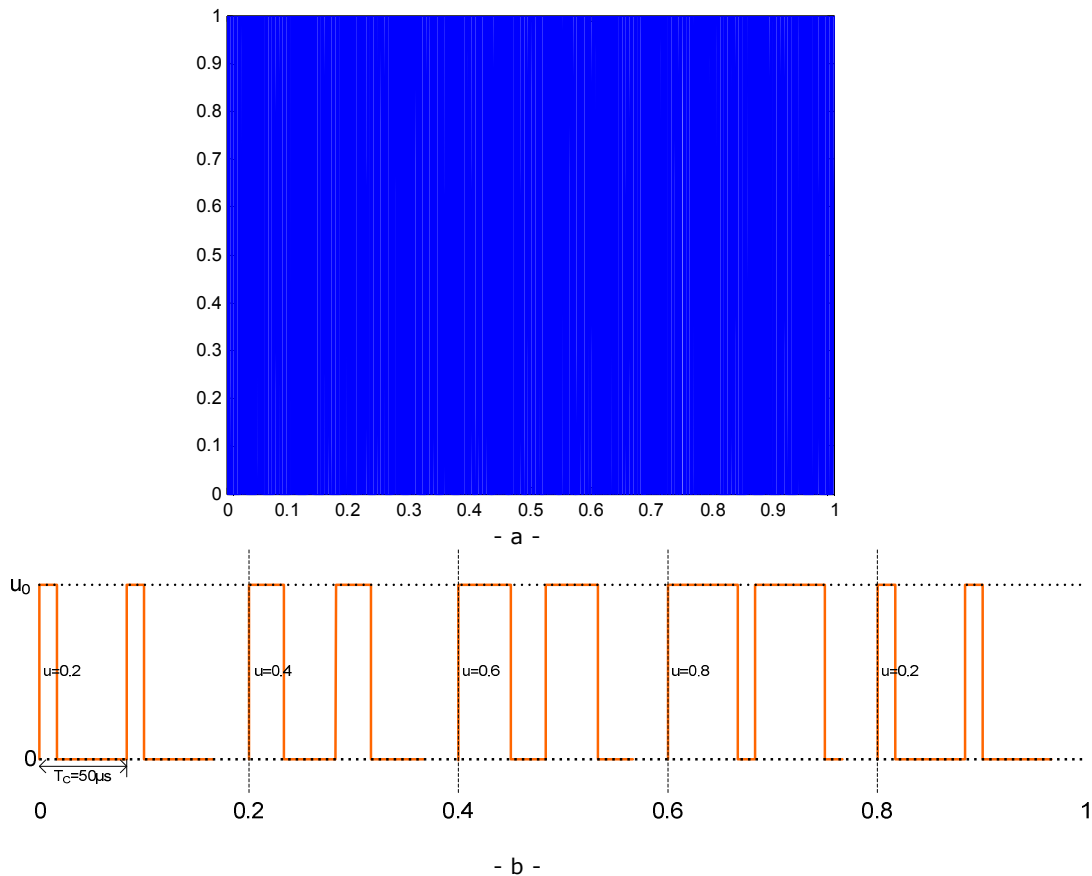


Fig. 4.4-7. a) Semnalul de comandă  $\tilde{u}(t)$  pentru scenariile de simulare 1 – 4.  
b) zoom al semnalului  $\tilde{u}(t)$

Primul scenariu, destinat validării modelului conexiunii *convector DC-DC – sarcină* s-a realizat cu *Schema Testare 1* și cu *Comutatorul Mod lucru/Mod test* în poziția de *Mod test*:

*Schema Testare 1 – Scenariul 1*

- convector alimentat cu un curent constant  $I_{pV\_p}(t) = 1$  A de la generatorul ideal de curent,
- semnal de comandă  $\tilde{u}(t)$  ca în Fig. 4.4-7.

Mărimile monitorizate au fost:

- tensiunea  $V_{pV\_p}(t)$ , (tensiunea de intrare a convertorului  $V_{IN}(t)$ ),
- tensiunea  $V_{OUT}(t)$  de la bornele consumatorului (sau ieșirea convertorului),
- tensiunea  $V_{C_1}(t)$  de la bornele condensatorului  $C_1$ ,
- curentul  $I_d(t)$  prin inductanța  $L$ .

În Fig. 4.4-8 se prezintă rezultatele obținute.

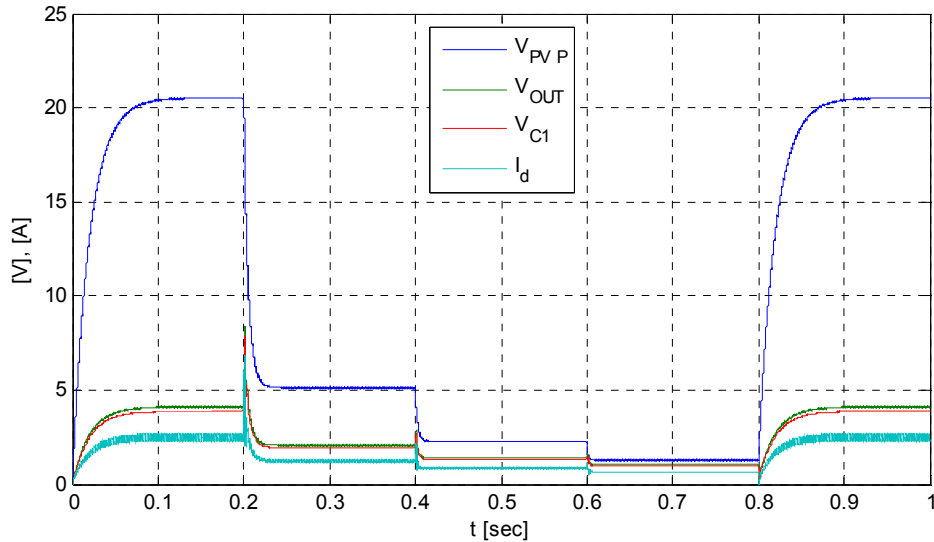


Fig. 4.4-8. Rezultate obținute cu *Schema Testare 1 - Scenariul 1*: semnalele  $V_{PV\_P}(t)$ ,  $V_{OUT}(t)$ ,  $V_{C1}(t)$  și  $I_d(t)$

Al doilea scenariu a fost destinat validării conexiunii *panou fotovoltaic - convertor DC-DC - sarcină*. S-a folosit tot *Schema Testare 1* cu comutatorul trecut în poziția *Mod lucru*:

*Schema Testare 1 - Scenariul 2:*

- convertor alimentat de la un panou fotovoltaic cu caracteristicile externe  $I(V)$  din Fig. 4.4-9 preluate din lucrarea [Taficht 2008];
- semnalul de comandă  $\tilde{u}(t)$  ca în Fig. 4.4-7;

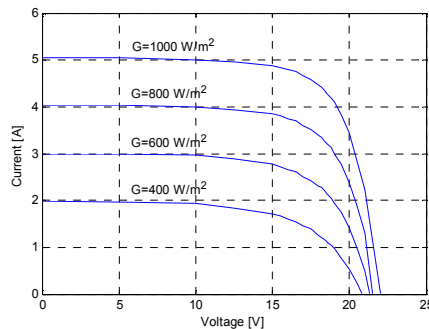
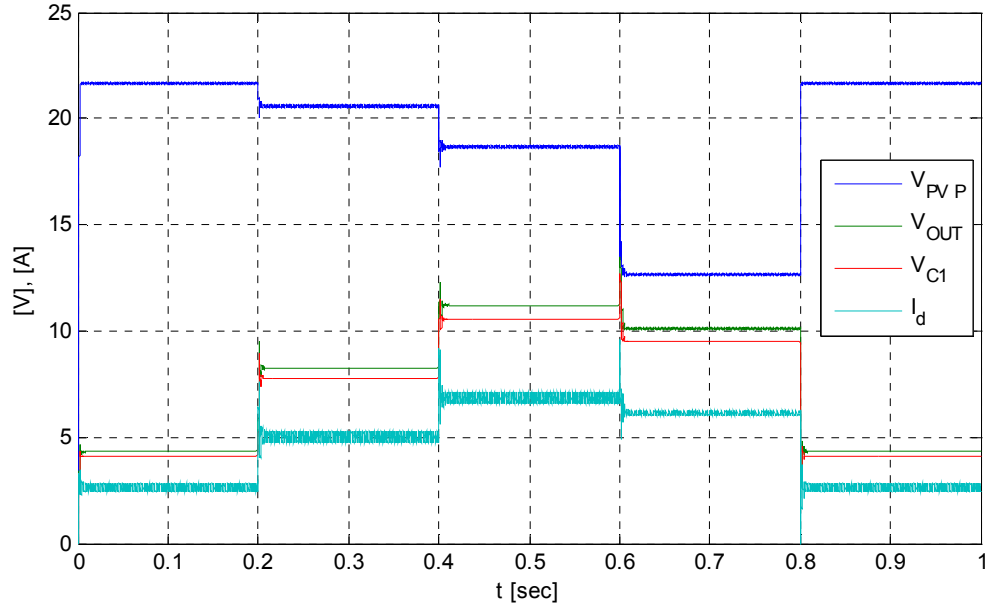


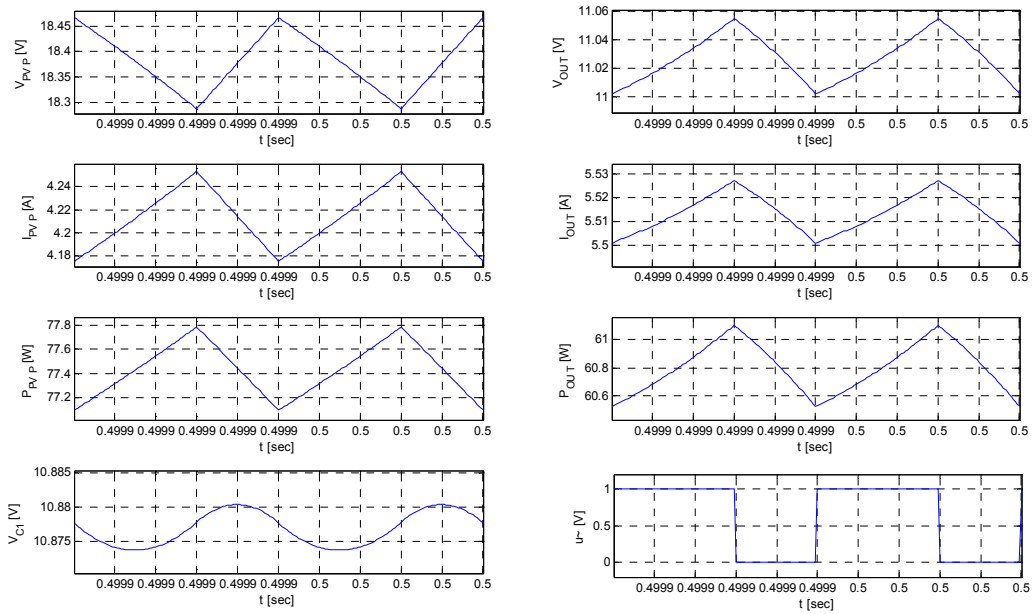
Fig. 4.4-9. Caracteristica  $I(V)$  utilizate în scenariile 2 și 4,  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

Mărimile monitorizate au fost aceleași cu cele din scenariul 1. În Fig. 4.4-10 ele sunt reprezentate pentru situația în care panoul „lucrează” pe o caracteristică externă cu  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  și  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .





- a -



- b -

Fig. 4.4-10. Rezultate obținute cu *Schema Testare 1 – Scenariul 2*: a) semnalele  $V_{PV\_p}(t)$ ,  $V_{OUT}(t)$ ,  $V_{C1}(t)$  și  $I_d(t)$  pentru panou în cazul  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ; b) zoom al semnalelor monitorizate pentru  $u = 0.4$

Variațiile din Fig. 4.4-10 b corespund regimului permanent oscilant determinat de aplicarea unui semnal de comandă cu  $u = 0.4$ . Având în vedere că oricare dintre mărimile din această figură poate fi folosită ca semnal de reacție într-o buclă de reglare este important să reținem anvergura domeniilor de variație ale acestora pe parcursul regimului permanent oscilant: cca. 0.2 V pentru  $V_{PV\_P}(t)$ , 0.05 V pentru  $V_{OUT}(t)$  ș.a.m.d.. Corelarea dimensiunilor acestor plaje de variație cu sensibilitatea traductoarelor folosite și cu precizia de reglare impusă ținând seama de domeniile de monotonie din Fig. 4.4-10b poate servi pentru evaluarea diferitelor strategii de reglare.

Din perspectiva elaborării de scenarii de conducere automată a ansamblului panou-convertor-sarcină prezintă importanță dependențele valorilor medii ale diferitelor mărimi din schemă  $V_{PV\_P}$ ,  $V_{OUT}$ ,  $I_{PV\_P}$ ,  $I_{OUT}$ ,  $P_{PV\_P} = I_{PV\_P} \cdot V_{PV\_P}$ ,  $P_{OUT} = I_{OUT} \cdot V_{OUT}$ ,  $V_{C1}$  în funcție de factorul de umplere  $u$ , determinate pentru  $G=400 \text{ W/m}^2$ ,  $G=600 \text{ W/m}^2$ ,  $G=800 \text{ W/m}^2$ ,  $G=1000 \text{ W/m}^2$  și  $\theta=25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ele sunt denumite în continuare caracteristici de comandă. Rezultatele obținute sunt redată în tabelele din Anexa 4.3. Pentru cazul  $G=1000 \text{ W/m}^2$  caracteristicile de comandă au aspectul din Fig. 4.4-11. Caracteristicile puterii pe la bornele panoului, obținute pentru întreaga gamă de valori ale lui  $G$  sunt redată în Fig. 4.4-12. Inspectarea lor conduce la următoarele observații:

- Variațiile tensiunii și curentului de la bornele panoului,  $V_{PV\_P\_med}(u)$  și  $I_{PV\_P\_med}(u)$  sunt strict monotone în timp ce variațiile tensiunii și curentului de la bornele sarcinii sunt monotone pe porțiuni, prezentând un maximum în jurul valorii  $u = 0.6$ . Aspectul monotoniei are un caracter general în sensul că se manifestă indiferent de valorile parametrilor  $G$  și  $\theta$ . Amplasarea punctului de maximum depinde însă de acești parametri.

- Puterile de transmitere a energiei pe la bornele de intrare  $P_{PV\_P\_med}(u)$  și de ieșire  $P_{OUT\_med}(u)$  ale convertorului prezintă același tip de monotonie, punctele de maximum corespunzând practic aceleași valori a lui  $u$  ca și tensiunii și curentului de la bornele sarcinii. Acest lucru se explică prin alura caracteristicii  $P(V)$  a panoului, respectiv prin faptul că  $P_{PV\_P\_med}(u) \cong P(V_{PV\_P\_med}(u))$ , iar dependența  $V_{PV\_P\_med}(u)$  este strict monotonă.

- Rezistența  $R_C$  contribuie la consumul de putere al convertorului, fapt evidențiat de poziționarea celor două caracteristici din Fig. 4.4-11c. Datorită valorii scăzute a rezistenței  $R_C$ , diferențele dintre  $V_{OUT}$  și  $V_{C1}$  sunt însă mici.

Comparând diagramele din Fig. 4.4-8 cu cele din Fig. 4.4-10a se constată că influența factorului de umplere  $u$  asupra tensiunilor de la bornele panoului și sarcinii este diferită. În ambele cazuri se respectă relația (5.1-1). Diferă însă caracteristicile de comandă. Diferența se datorează faptului că un panou fotovoltaic nu se comportă ca și un generator ideal de curent constant. În cazul panoului valoarea curentului depinde de punctul de funcționare.

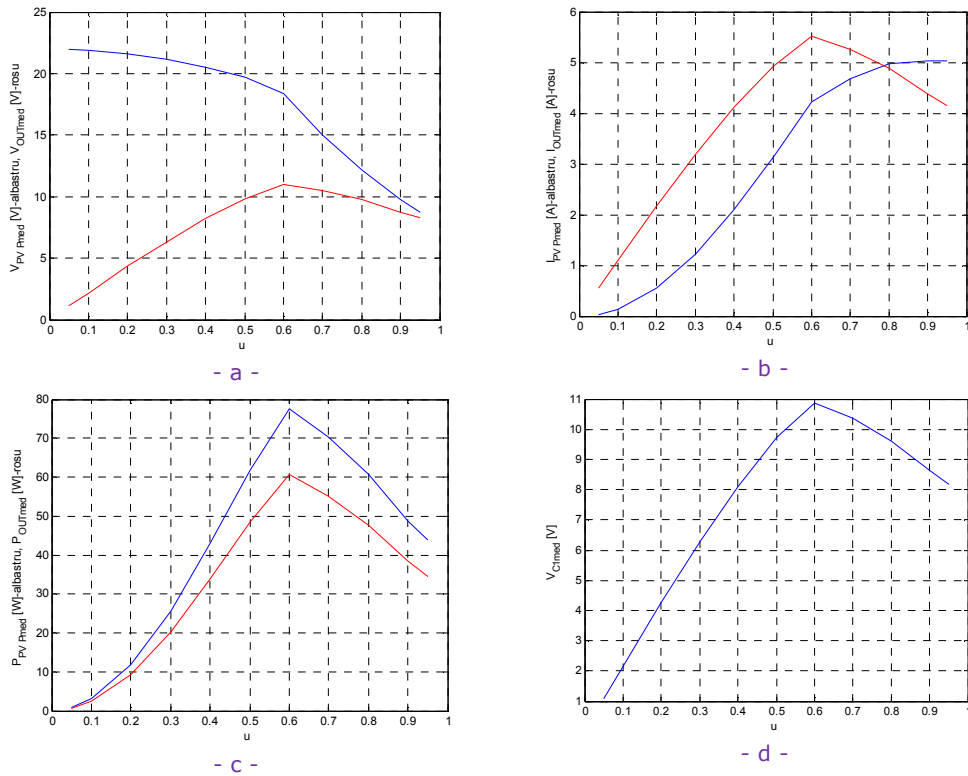


Fig. 4.4-11. Caracteristici de comandă pentru schema din Fig. 4.4-4: a)  $V_{PV\_P\_med}(u)$  - albastru,  $V_{OUT\_med}(u)$  - roșu; b)  $I_{PV\_P\_med}(u)$  - albastru,  $I_{OUT\_med}(u)$  - roșu; c)  $P_{PV\_P\_med}(u)$  - albastru,  $P_{OUT\_med}(u)$  - roșu; d)  $V_{C1\_med}(u)$

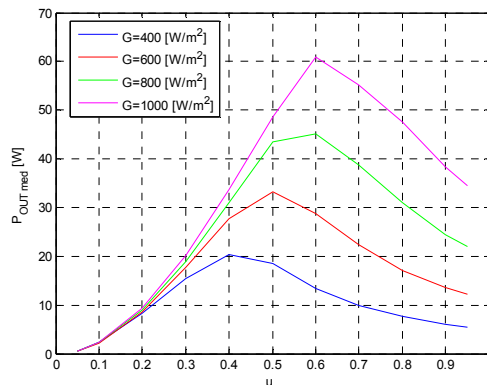


Fig. 4.4-12. Caracteristici de comandă  $P_{PV\_P\_med}(u)$  pentru  $\theta=25^\circ C$ , respectiv  $G=400 W/m^2$  - albastru,  $G=600 W/m^2$  - roșu,  $G=800 W/m^2$  - verde,  $G=1000 W/m^2$  - mov

#### 4.4.2. Convertorul Boost

Convertorul Boost se folosește pentru a crește tensiunea de ieșire în raport cu tensiunea de intrare. Prezentarea din acest paragraf urmează aceleași etape ca și în paragraful anterior. Schema electrică de principiu a convertorului Boost are aspectul din Fig. 4.4-13.

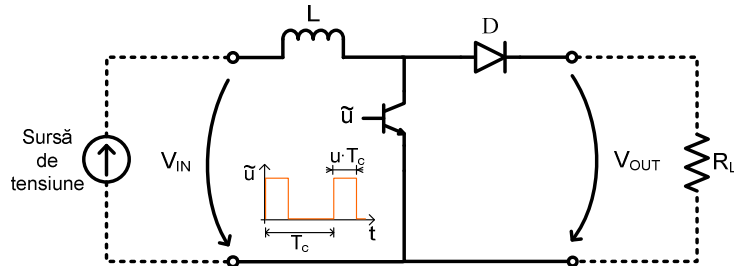


Fig. 4.4-13. Schemă electrică de principiu a convertorului Boost alimentat de la o sursă tensiune

Ca și în cazul convertorului Buck, convertorul Boost este alimentat de la o sursă ideală de tensiune, de valoare  $V_{IN}(t)$ , iar ieșirea la o sarcină de rezistență  $R_L$ , tensiunea de ieșire fiind notată cu  $V_{OUT}(t)$ . În regim staționar periodic, relația dintre valoarea medie a tensiunii de intrare  $\bar{V}_{IN}$  și valoarea medie a tensiunii de ieșire  $\bar{V}_{OUT}$  este dată de relația (4.4-5) [Masri 2010], unde  $u$  este factorul de umplere al semnalului de comandă al comutatorului (tranzistorului).

$$\bar{V}_{OUT} = \frac{1}{1-u} \cdot \bar{V}_{IN} \quad (4.4-5)$$

În cazul alimentării convertorului Boost DC-DC de la un panou fotovoltaic la bornele panoului se conectează condensatorul  $C_2$  conform schemei din Fig. 4.4-14.

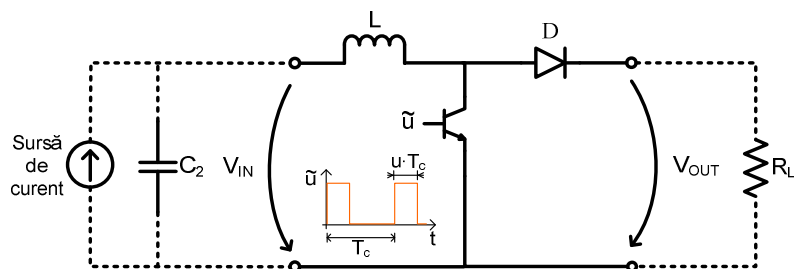


Fig. 4.4-14. Schemă electrică de principiu a convertorului Boost alimentat de la o sursă curent

Prin intermediul semnalului de comandă  $\tilde{u}$  (de amplitudinea  $\tilde{u}_0$ ) pot fi implementate diferite strategii de conducere, în particular strategii de obținere a punctului de putere maximă. Și pentru acest caz, în lucrarea [Korodi 2011] autorul tezei dezvoltă un sistem de determinare și urmărire a punctului de putere maximă pentru un panou fotovoltaic care alimentează o sarcină rezistivă folosind un convertor Boost cu schema din Fig. 4.4-15. Acesta folosește, în plus față de structura de principiu, grupul  $R_C - C_1$  de netezire a variațiilor tensiunii  $V_{OUT}(t)$ .

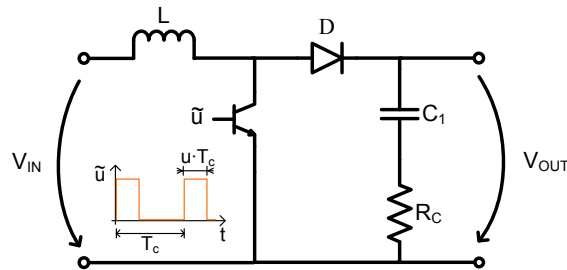


Fig. 4.4-15. Schemă electrică a unui convertor Boost cu element de netezire

Întreaga structură a conexiunii panou-converter Boost-consumator este prezentată în Fig. 4.4-16.

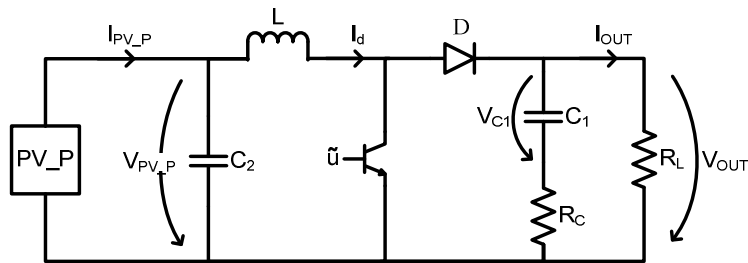


Fig. 4.4-16. Conexiune panou - convertor Boost - consumator

În ipoteza folosirii pentru panoul fotovoltaic a unuia dintre modelele considerate în paragraful 2.3 și a unei sarcini rezistive ca în Fig. 4.4-16, conexiunea poate fi privită, la fel ca și în cazul convertorului Boost, ca un sistem neliniar, dinamic, de ordinul 3, variat în timp, datorită modificării permanente a caracteristicii externe  $I_{PV\_P}(V_{PV\_P})$  a panoului fotovoltaic în funcție de nivelul de iluminare și temperatura mediului exterior.

Sistemul are ca *mărime de intrare* factorului de umplere  $u$  al procesului de comutație transmis prin semnalul de comandă  $\tilde{u}$ , (impulsuri de amplitudine  $\tilde{u}_0$  și perioadă constantă), iar ca *mărimi de ieșire* pe:

- $I_{PV\_P}(t)$  - curentul de la ieșirea panoului fotovoltaic,
- $V_{OUT}(t)$  - tensiunea de la ieșirea convertorului DC-DC (în cazul particular prezentat în Fig. 4.4-16, tensiunea de pe rezistorul  $R_L$ ),
- $I_{OUT}(t)$  - curentul prin consumatorul de la ieșirea convertorului DC-DC.

*Mărimile de stare* ale sistemului sunt:

- $V_{PV\_P}(t)$  - tensiunea de pe condensatorul  $C_2$  (tensiunea de la intrarea convertorului DC-DC corespunzătoare  $I_{PV\_P}(t)$ ),
- $I_d(t)$  - curentul prin inductanța  $L$ ,
- $V_{C1}(t)$  - tensiunea pe condensatorul  $C_1$ .

Modelul matematic intrare-stare-ieșire al acestui sistem are ecuațiile de stare (4.4-6) și ecuațiile de ieșire (4.4-7).

$$\begin{cases} \frac{dV_{PV\_P}(t)}{dt} = \frac{1}{C_2} \cdot I_{PV\_P}(V_{PV\_P}(t)) - \frac{1}{C_2} \cdot I_d(t) \\ \frac{dI_d(t)}{dt} = \frac{1}{L} V_{PV\_P}(t) - \left(1 - \frac{\tilde{u}(t)}{\tilde{u}_0}\right) \cdot \left(\frac{1}{L} \cdot \frac{R_L \cdot R_C}{R_L + R_C} I_d(t) - \frac{1}{L} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_C} \cdot V_{C_1}(t)\right) \\ \frac{dV_{C_1}(t)}{dt} = \left(1 - \frac{\tilde{u}(t)}{\tilde{u}_0}\right) \cdot \frac{1}{C_1} \cdot \frac{R_L}{R_L + R_C} \cdot I_d(t) - \frac{1}{C_1} \cdot \frac{1}{R_L + R_C} \cdot V_{C_1}(t) \end{cases} \quad (4.4 - 6)$$

$$\begin{cases} I_{PV\_P}(t) = I_{PV\_P}(V_{PV\_P}(t)) \\ I_{OUT}(t) = \left(1 - \frac{\tilde{u}(t)}{\tilde{u}_0}\right) \cdot \frac{R_C}{R_L + R_C} \cdot I_d(t) + \frac{1}{R_L + R_C} \cdot V_{C_1}(t) \\ V_{OUT}(t) = \left(1 - \frac{\tilde{u}(t)}{\tilde{u}_0}\right) \cdot \frac{R_L \cdot R_C}{R_L + R_C} \cdot I_d(t) + \frac{R_L}{R_L + R_C} \cdot V_{C_1}(t) \end{cases} \quad (4.4 - 7)$$

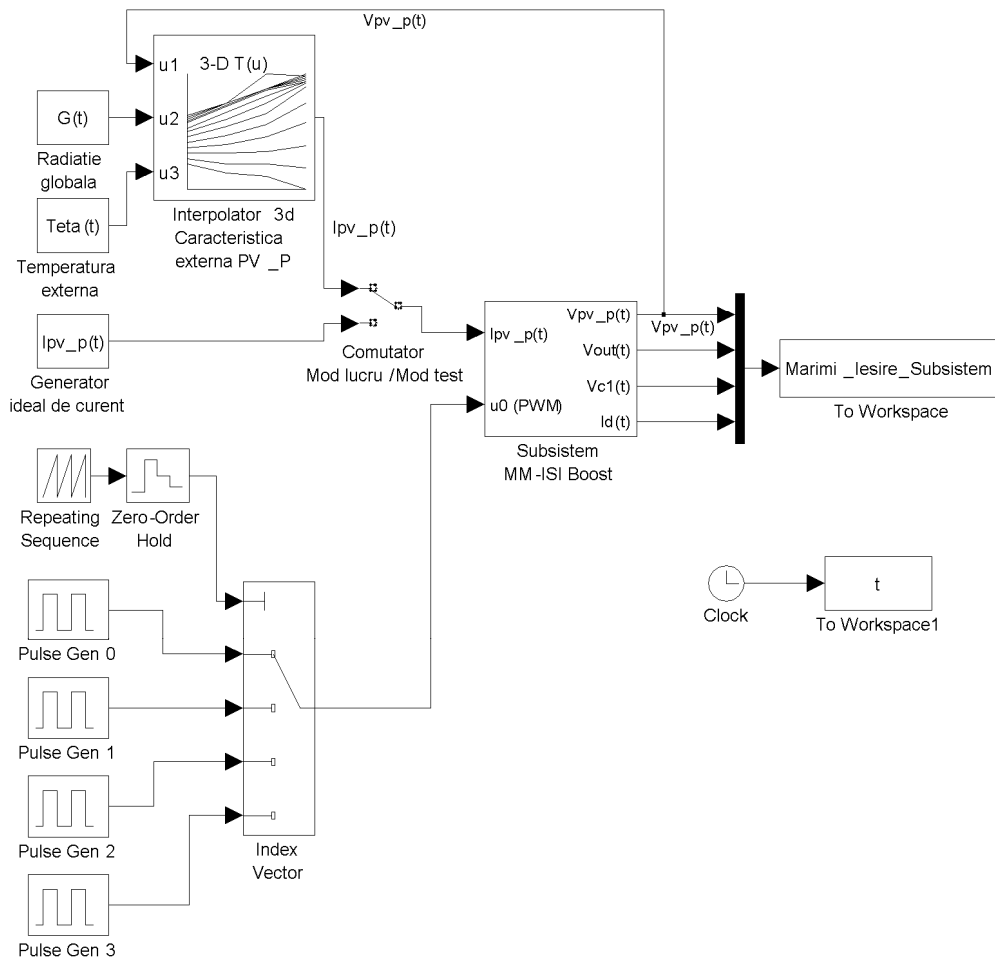


Fig. 4.4-17. Schemă Simulink de Testare a MM-ISI al sistemului PV\_P - Convertor Boost - Consumator prezentat în Fig. 4.4-16. (schema Testare 2)

Pentru validarea modelului matematic (4.4-6) - (4.4-7), a fost realizat modelul Simulink *Testare MM-ISI al sistemului PV\_P - Convertor Boost - Consumator* prezentat în Fig. 4.4-17. În schemă, modelul (4.4-6) - (4.4-7) este integrat în blocul „Subsistem MM-ISI Boost” și blocul Interpolator 3d (care implementează familia de caracteristici externe ale panoului). Comutatorul de la intrarea blocului „Subsistem MM-ISI Boost” permite, spre deosebire de schema din Fig. 4.4-16, comutarea intrării convertorului și la un generator ideal de curent. Pentru acest de al doilea caz prima ecuație din (4.4-6) ia forma:

$$\frac{dV_{PV\_P}(t)}{dt} = \frac{1}{C_2} \cdot I_{PV\_P}(t) - \frac{1}{C_2} \cdot I_d(t). \quad (4.4-8)$$

În Fig. 4.4-18 este detaliat *Subsistemul MM-ISI Boost* din Fig. 4.4-17. Valorile parametrilor convertorului sunt:  $L=0.4$  mH,  $C_1=470$   $\mu$ F,  $R_C=0.001$   $\Omega$  și  $C_2=470$   $\mu$ F, iar rezistența de sarcină are valoarea  $R_L=25$   $\Omega$ .

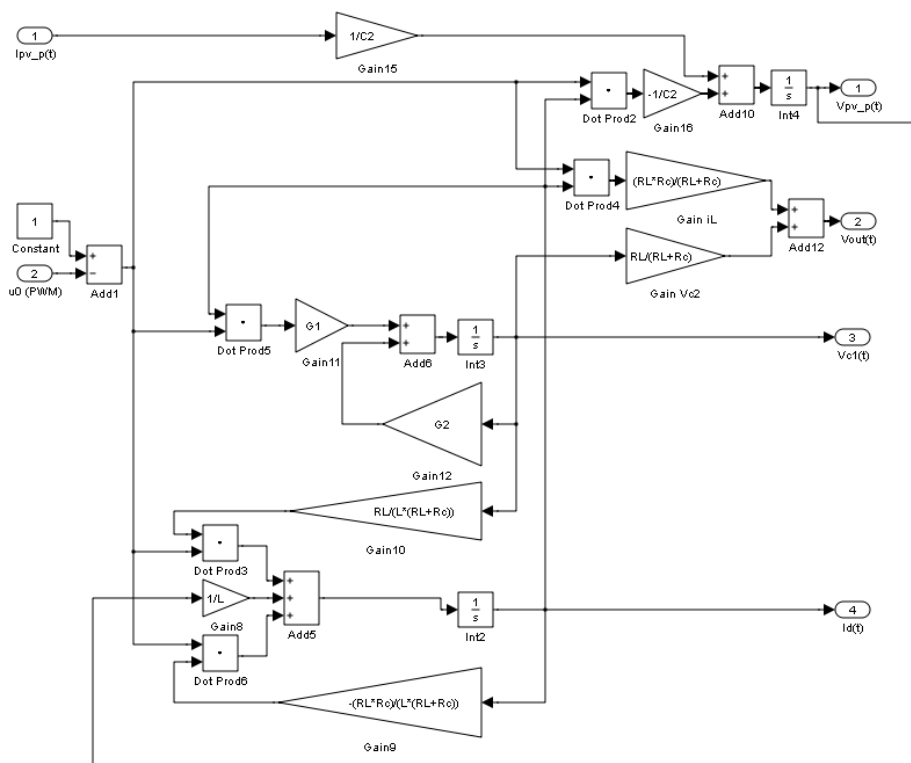
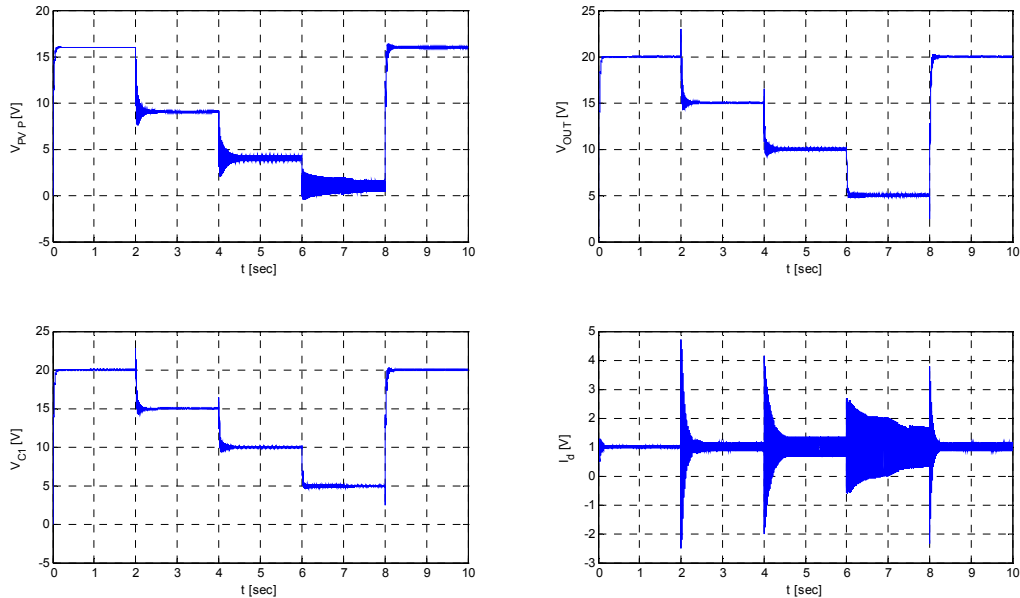


Fig. 4.4-18. Modelul Simulink corespunzător *MM-ISI convertor Boost*

Pentru validarea modelului conexiunii convertor DC-DC – sarcină s-a trecut *Comutatorul Mod lucru/Mod test* în poziția de *Mod test* și s-a folosit același scenariu ca și în cazul convertorului Buck:

*Schema Testare 2 – Scenariul 3* este identic, cu excepția tipului de convertor, cu Scenariul 1. Au fost monitorizate aceleași mărimi.

În Fig. 4.4-19 sunt ilustrate rezultatele obținute prin simulare, adică semnalele  $V_{PV\_P}(t)$ ,  $V_{OUT}(t)$ ,  $V_{C_1}(t)$  și  $I_d(t)$ .



- b -

Fig. 4.4-19. Rezultate obținute în urma testului *MM-ISI convertor Boost, Scenariul 3*

Pentru validarea conexiunii *panou fotovoltaic - convertor DC-DC - sarcină* s-a trecut comutatorul în poziția *Mod lucru* și s-a aplicat următorul scenariu:

*Schema Testare 2 - Scenariul 4* este identic, cu excepția tipului de convertor, cu Scenariul 2. Au fost monitorizate aceleași mărimi.

Semnalele monitorizate au aspectul din Fig. 4.4-20. Variațiile din Fig. 4.4-20b corespund regimului permanent oscilant determinat de aplicarea unui semnal de comandă cu  $u = 0.6$ , pentru o caracteristică externă de parametru  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ . Pe parcursul regimului permanent oscilant variațiile mărimilor de același nume sunt cu cca. un ordin de mărime mai mici decât în cazul schemei cu convertor buck ceea ce înseamnă că în acest caz precizia de reglare poate fi mai mare decât pentru schemele din paragraful anterior. Datorită valori scăzute a rezistenței  $R_C$ , diferențele dintre  $V_{OUT}$  și  $V_{C_1}$  sunt foarte mici.



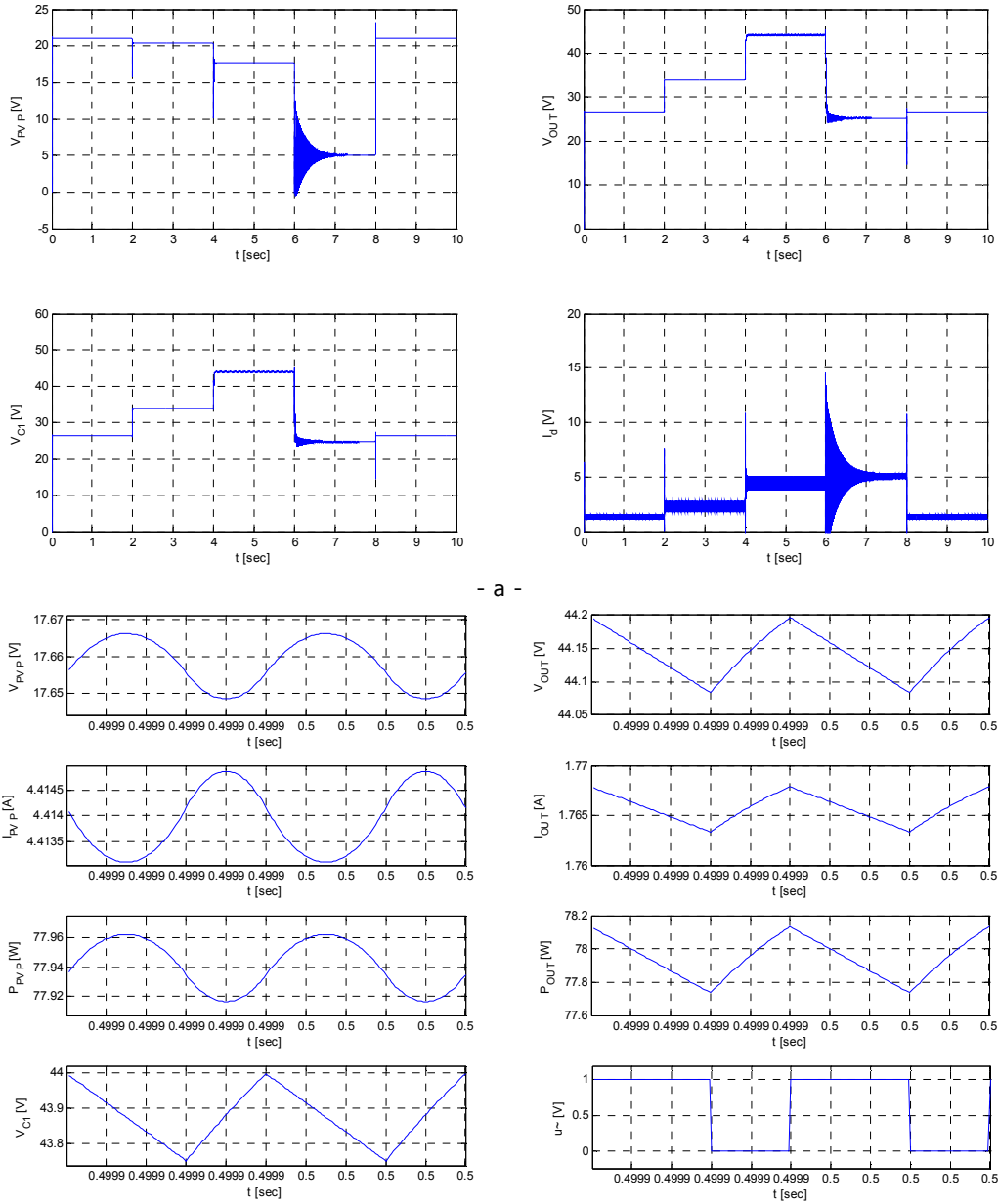


Fig. 4.4-20. Rezultate obținute în urma testului MM-ISI convertor Boost, Scenariul 4:  
 a) semnalele  $V_{pv\_p}(t)$ ,  $V_{out}(t)$ ,  $V_{C1}(t)$  și  $I_d(t)$  pentru panou în cazul  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ;  
 b) zoom al semnalelor monitorizate pentru  $u = 0.6$

Dependențele valorilor medii ale diferitelor mărimi din schemă  $V_{pv\_p}$ ,  $V_{out}$ ,  $I_{pv\_p}$ ,  $I_{out}$ ,  $P_{pv\_p}$ ,  $P_{out}$ ,  $V_{C1}$  în funcție de valorile lui  $u$  (caracteristici

de comandă) determinate pentru  $G=400 \text{ W/m}^2$ ,  $G=600 \text{ W/m}^2$ ,  $G=800 \text{ W/m}^2$ ,  $G=1000 \text{ W/m}^2$  și  $\theta=25 \text{ }^\circ\text{C}$  sunt redată în Fig. 4.4-21. Rezultatele obținute sunt redată în tabelele din Anexa 4.4. Pentru cazul  $G=1000 \text{ W/m}^2$  caracteristicile de comandă au aspectul din Fig. 4.4-21. Și în acest caz, sunt valabile, cu mici diferențe, observațiile făcute cu prilejul inspectării caracteristicilor din figurile 4.4-11 și 4.4-12. Și de data aceasta punctele de maximum apar în vecinătatea valorii  $u = 0.6$ .

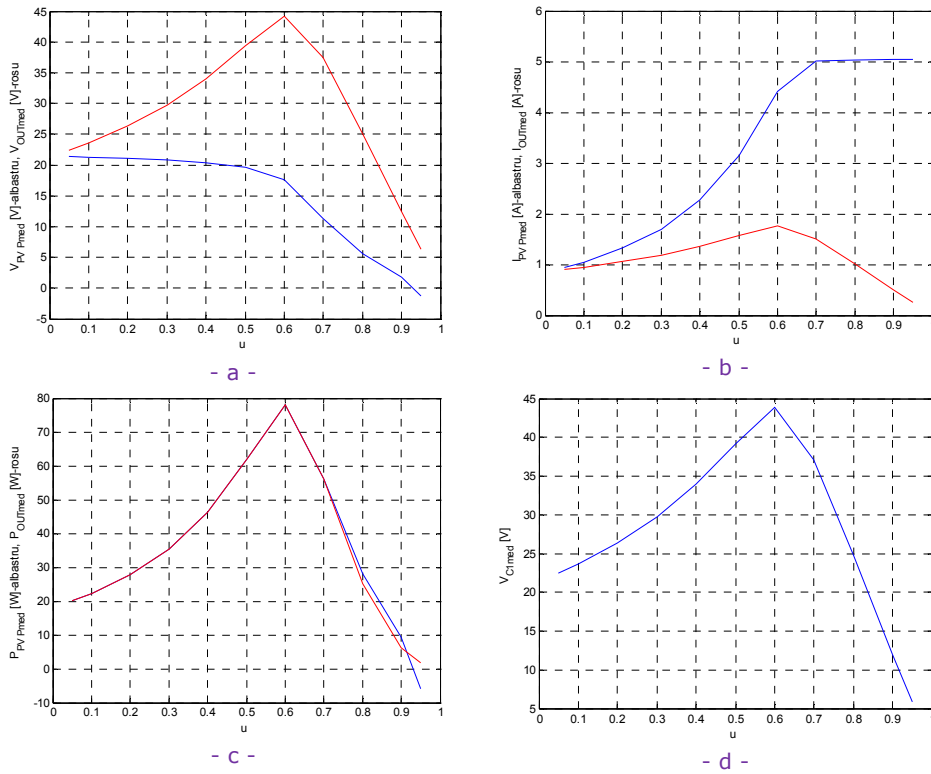


Fig. 4.4-21. Caracteristici de comandă pentru schema din Fig. 4.4-16: a)  $V_{PV\_P\_med}(u)$  - albastru,  $V_{OUT\_med}(u)$  - roșu; b)  $I_{PV\_P\_med}(u)$  - albastru,  $I_{OUT\_med}(u)$  - roșu; c)  $P_{PV\_P\_med}(u)$  - albastru,  $P_{OUT\_med}(u)$  - roșu; d)  $V_{C1\_med}(u)$

În Fig. 4.4-22 sunt reprezentate caracteristicile de comandă  $P_{PV\_P\_med}(u)$  pentru întreaga gamă de valori ale lui  $G$ .

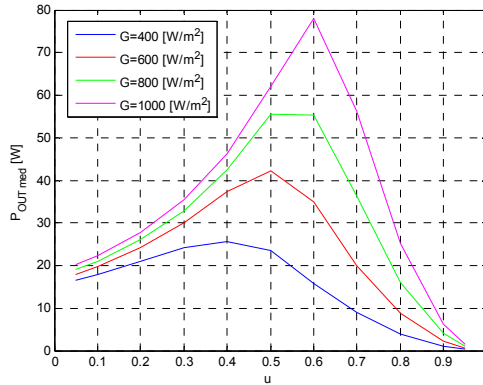


Fig. 4.4-22. Caracteristici de comandă  $P_{PV\_p\_med}(u)$  pentru  $\theta=25\text{ }^\circ\text{C}$ , respectiv  $G=400\text{ W/m}^2$  - albastru,  $G=600\text{ W/m}^2$  - roșu,  $G=800\text{ W/m}^2$  - verde,  $G=1000\text{ W/m}^2$  - mov

În ambele scenarii se respectă relația (5.2-1), dar caracteristicile de comandă diferă. Diferența are aceeași explicație ca și în cazul convertorului Buck. Datorită valorii scăzute a perioadei de comutație ( $T_C$ ) și a valorii ridicate a capacităților  $C_1$ , respectiv  $C_2$ , există o întârziere în atingerea valorii prescrise. După această întârziere, raportul dintre  $\bar{V}_{IN}$  și  $\bar{V}_{OUT}$  este conform valorii factorului de umplere  $u$ .

**4.4.3. Analiza comportării unei structuri de reglare a tensiunii de la bornele unui panou fotovoltaic folosind referința de tensiune obținută prin interpolare**

În acest paragraf se prezintă un studiu de caz corespunzător particularizării structurii din Fig. 4.3.5 sub forma din Fig. 4.4-23.

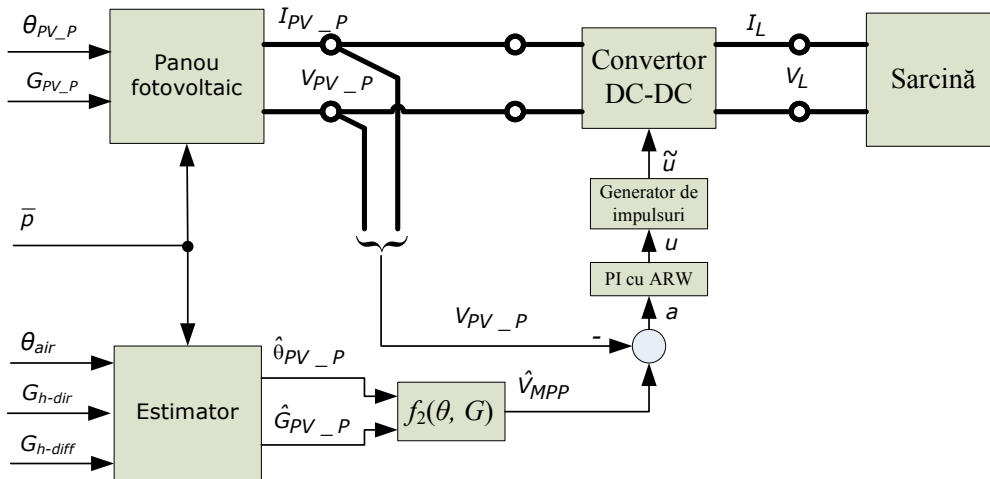


Fig. 4.4-23. Sistem de reglare a tensiunii de la bornele unui panou fotovoltaic folosind ca mărime de referință tensiunea corespunzătoare MPP obținută de la un bloc interpolator

Studiul s-a realizat simulând diferite regimuri de funcționare în contextul prezentat în continuare.

S-a considerat un panou fotovoltaic cu caracteristicile externe  $I(V)$  din Fig. 4.3-2, respectiv convertoarele modelate și studiate în paragrafele 4.3.1 și 4.3.2., cu parametri  $C_1=470 \mu\text{F}$ ,  $C_2=470 \mu\text{F}$ ,  $L=0.4 \text{ mH}$ . În cursul diferitelor scenarii de studiu rezistența de sarcină s-a considerat constantă adoptându-se valori care pentru condițiile de mediu simulate, au condus la variații ale factorului de umplere  $u$  în jurul valorii de 50%.

Funcția de reglare pe care trebuie să o îndeplinească schema este exprimată prin condiția

$$V_{PV\_P}(t) = \hat{V}_{MPP}(t)$$

în care  $V_{PV\_P}$  este mărimea reglată iar  $\hat{V}_{MPP}$  este mărimea de referință. Referința se obține prin estimarea coordonatei tensiunii  $\hat{V}_{MPP}$  corespunzătoare MPP potrivit metodei prezentate în paragraful 4.3. Comanda convertorului DC-DC se obține de la un regulator PI cu limitare ARW [Preitl 1996], [Åström 1997]. Regulatorul sintetizează factorul de umplere  $u$  în funcție de eroarea de reglare

$$a(t) = \hat{V}_{MPP}(t) - V_{PV\_P}(t).$$

În regim liniar regulatorul realizează legea de reglare:

$$u(t) = K_P \cdot a(t) + K_I \cdot \int a(t) \cdot dt, \quad (4.4-9)$$

Generatorul de impulsuri transformă valoarea lui  $u$  în semnalul de comandă  $\tilde{u}$ , de tip semnal PWM, cu factor de umplere egal cu  $u$ .

Din punct de vedere fizic, considerăm că atât regulatorul cât și generatorul de semnal se realizează cu ajutorul unui microcontroler având în vedere următoarele considerente:

- În ipoteza că pasul de discretizare a timpului  $h$  are o valoare mică din punctul de vedere al proceselor tranzitorii din paragraful precedent (de exemplu cele din Fig. 4.4-8a), implementarea legii de reglare (4.4-9) se poate face prin discretizare prin aproximare folosind, de exemplu, metoda Tustin [Åström 1997]. Se obține

$$\begin{cases} u[kh] = u[(k-1)h] + a[kh] \cdot K_P \cdot (0.5 \cdot h \cdot K_I / K_P + 1) + \\ \quad + a[(k-1)h] \cdot K_P \cdot (0.5 \cdot h \cdot K_I / K_P - 1) & \text{daca ARW nu este activ} \\ u[kh] \in \{u_{min}, u_{max}\} & \text{daca ARW este activ} \end{cases} \quad (4.4-10)$$

unde,  $u_{min}$  și  $u_{max}$  reprezintă pragurile de setare ale blocului ARW, iar  $k \in Z$ . S-a adoptat  $h=0.00005$  secunde.

- Generatorul de impulsuri furnizează semnalul de comandă  $\tilde{u}$ :

$$\tilde{u}(t) = \tilde{u}_0 \cdot [\sigma(t - kh) - \sigma(t - kh - ku[kh])] \quad (4.4-11)$$

Proiectarea regulatorului PI a fost redusă la o acordare cvasiempirică. Astfel, rescriind legea de reglare sub forma

$$u(t) = K_P \cdot a(t) + K_I \cdot \int a(t) \cdot dt = K_P \cdot \left[ a(t) + \frac{1}{T_I} \int a(t) \cdot dt \right].$$

s-a adoptat  $T_I = 0.1$  secunde. Adoptarea s-a bazat pe observarea proceselor tranzitorii din înregistrări de tipul celor din Fig. 4.4-8. Răspunsurile în tensiune la variații în treaptă indică, în cazul particular la care se referă figura, un proces condus cu o constantă de timp dominantă de cca. 0.08 secunde. Ținând seama de faptul că prin parametrul  $T_I$  se poate compensa constanta de timp dominantă și că aceasta prezintă mici variații în funcție de caracteristica externă pe care lucrează panoul s-a adoptat valoarea menționată.

Adoptarea valorii parametrului  $K_p$  s-a făcut practic empiric. Acest lucru se explică, pe de-o parte, prin faptul că obiectivul urmărit nu l-a reprezentat o proiectare optimă a buclei de reglare, ci doar stabilizarea ei pentru a ilustra pe această bază generarea interpolativă a referinței. Pe de altă parte o proiectare optimă a regulatorului presupune un studiu amplu care trebuie să aibă în vedere caracterul de proces cu structură variabilă a ansamblului panou fotovoltaic – convertor DC-DC – sarcină, la care mărimea de ieșire, tensiunea de la bornele panoului, depinde în funcție de tipul convertorului și de momentul curent din cursul perioadei unui impuls de un număr variabil de mărimi de stare. Practic am avut în vedere faptul că procesul condus este stabil și principiul unanim acceptat în reglajul convențional că în cazul când procesul condus este stabil bucla de reglare menține stabilitatea atunci când amplificarea regulatorului este de valoare mică. Pe această bază, prin încercări succesive, s-a obținut  $K_p=0.00025$ . Întrucât  $T_I = K_p/K_I$  a rezultat, în continuare,  $K_I=0.0025$ .

În cele ce urmează se prezintă două experimente: experimentul 1 corespunzător unui panou conectat la un convertor Boost și experimentul 2 pentru cazul conectării la un convertor Buck. În ambele experimente scenariul a fost același: o variație a intensității radiației solare redată de graficele din colțul din stânga sus al Fig. 4.4-24 și al Fig. 4.4-25, corespunzătoare unei creșteri și unei scăderi a intensității radiației solare pe durata a 1.3 secunde. Pentru valoarea intensității radiației solare avem:

- valoarea de start de  $400 \text{ W/m}^2$ ;
- între 0.3 - 0.7 secunde, intensitatea radiației solare crește până la valoare de  $800 \text{ W/m}^2$ ;
- între 1 - 1.2 secunde, intensitatea radiației solare scade până la valoarea de  $600 \text{ W/m}^2$ ;
- între 1.2 - 1.3 secunde, intensitatea radiației solare rămâne constantă.

Intervalul de timp considerat fiind de doar 1.3 secunde, s-a lucrat cu o temperatură constantă a mediului ambiant de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Rezultatele primului experiment (convertor Boost) ilustrate în Fig. 4.4-24 s-au obținut pentru o rezistență de sarcină  $R_L = 25 \text{ } \Omega$ .

Rezultatele celui de al doilea experiment (convertor Buck), sunt prezentate în Fig. 4.4-25. Aici am folosit o rezistență de sarcină  $R_L = 2 \text{ } \Omega$

Ambele figuri redau variațiile în timp ale intensității radiației solare,  $\hat{V}_{MPP}$  furnizat de RVG, factorului de umplere,  $u$ , curentului și tensiunii la bornele panoului,  $I_{PV\_Pr}$ ,  $V_{PV\_Pr}$ , și mărimilor de la nivelul rezistenței de sarcină:  $P_L$  (puterea obținută pe rezistență),  $I_L$ ,  $V_L$ .

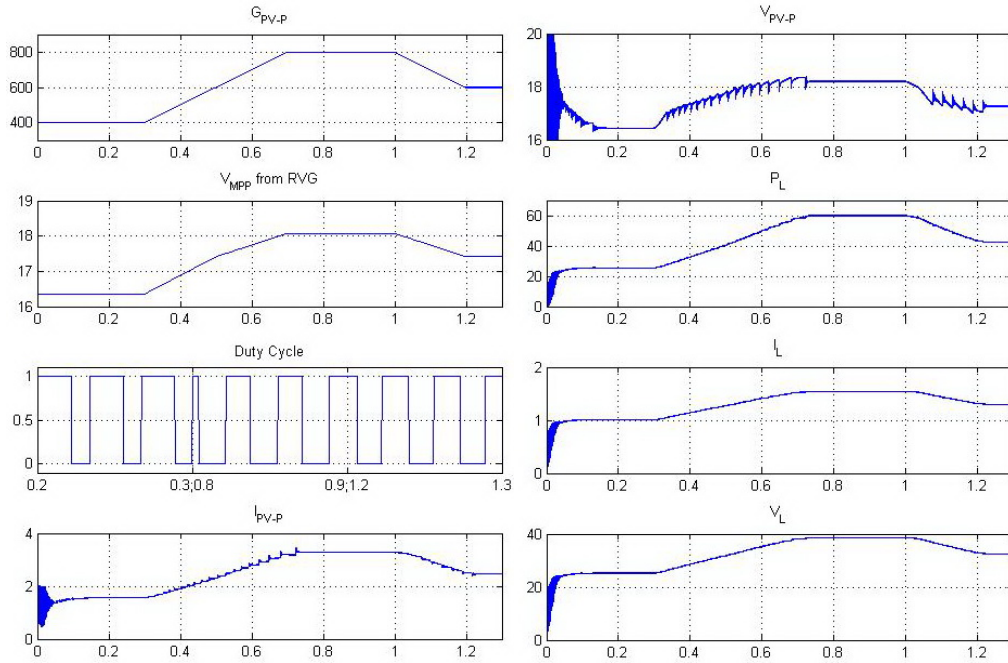


Fig. 4.4-24. Comportarea sistemului de reglare din Fig. 4.4-23 în cazul unui convertor Boost

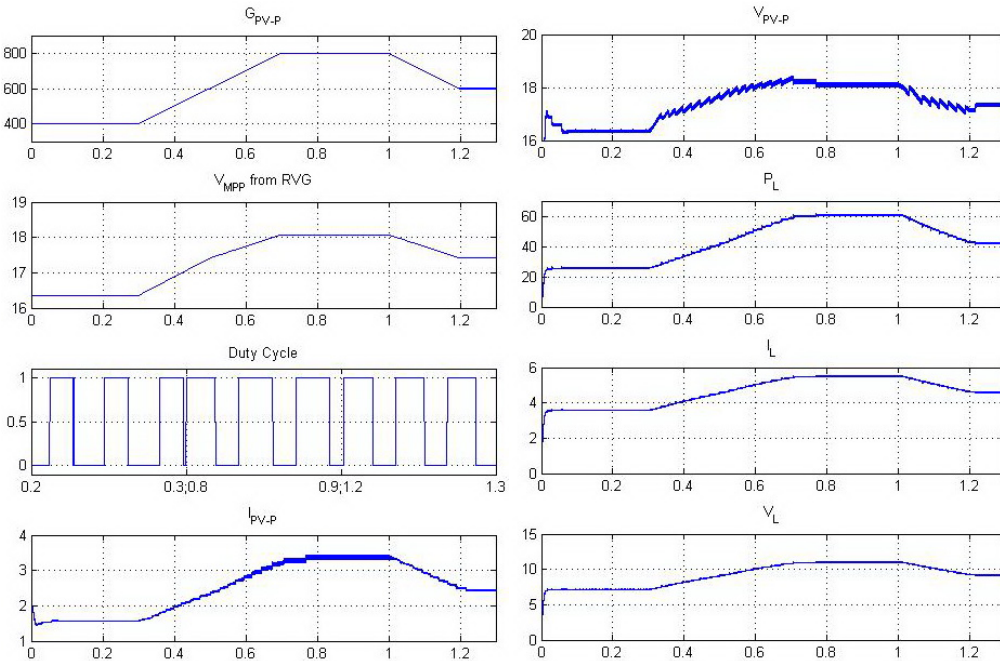


Fig. 4.4-25. Comportarea sistemului de reglare din Fig. 4.4-23 în cazul unui convertor Buck

Din inspectarea rezultatelor obținute se desprind următoarele observații:

- Ambele scheme au o comportare stabilă la variațiile mărimii de referință  $\hat{V}_{MPP}$  cauzate de modificarea lui  $G$ .
- Structurile asigură practic suficient de bine funcția de reglare. Oscilațiile care apar în curentul și tensiunea de la bornele panoului, datorată limitărilor de modelare în Simulink a semnalului de comandă  $\tilde{u}$ , nu se resimt la nivelul sarcinii.
- Scenariul utilizat pentru evoluția intensității radiației solare acoperă schimbările reale, mai lente, ale intensității radiației solare.

Rezultatele din acest paragraf au fost publicate într-o variantă concentrată în lucrarea [Korodi 2011].

## 5. CONCLUZII

### 5.1 Rezultate

Potrivit capitolului 1 obiectele cercetărilor la care se referă prezenta teză de doctorat, toate circumscrise problematicii modelării dispozitivelor fotovoltaice și utilizării modelelor, au fost următoarele:

- i) sistematizarea, clarificarea și completarea cunoștințelor și tehnicilor folosite pentru modelarea dispozitivelor fotovoltaice,
- ii) realizarea unui emulator de panouri fotovoltaice,
- iii) utilizarea de modele asociate dispozitivelor fotovoltaice pentru conducerea de sisteme cu panouri fotovoltaice.

i) Necesitatea de a sistematiza și clarifica anumite aspecte referitoare la modelele dispozitivelor fotovoltaice a derivat din faptul că datorită imposibilității de a descrie cantitativ în mod exact procesele din interiorul unei celule fotovoltaice la ora actuală nu există un model standard pentru dispozitivele fotovoltaice. În literatură se operează cu mai multe tipuri de modele, toate fiind modele de aproximare, fără a exista o prezentare sistematică și o comparare a acestora. De asemenea, cu excepția modelelor empirice, nu există metode sistematice de identificare a parametrilor modelelor. Acest aspect este foarte important în primul rând pentru modelul M-2D care oferă cea mai bună aproximare dintre modelele studiate.

Pentru caracterizarea dispozitivelor fotovoltaice se folosește în principal dependența  $I(V)$  dintre tensiunea și curentul la bornele dispozitivului, dependență denumită pe parcursul lucrării caracteristică externă. Plecând de observația că dependențele  $I(V)$  pentru celule și panouri sunt asemănătoare și de la observația că însăși modelele conceptuale ale celulelor operează cu parametri echivalenți, s-a considerat că modelele matematice ale celulelor sunt valabile și pentru panouri, parametrii echivalenți corespunzând panoului. Pe această bază, în teză referirile se fac de cele mai multe ori cu privire la dispozitive fotovoltaice.

Principalele rezultate asociate primului obiectiv sunt (în paranteze se indică paragraful în care apar rezultatele):

i.a) *Au fost selectate 7 modele utilizabile pentru caracteristicile externe ale dispozitivelor fotovoltaice, 6 modele de tip parametric și un model neparametric, și a fost precizată maniera în care acestea trebuie interpretate din punct de vedere sistemic.*

Ca modelele parametrică au fost reținute trei modele bazate pe scheme electrice echivalente (2.2.) și trei modele empirice (2.3). Modelul neparametric, este de tipul „model interpolativ” și este specific fiecărui dispozitiv fotovoltaic în parte (2.4). Interpretarea sistemică a modelelor este făcută din perspectiva integrării lor sub formă de modele intrare-ieșire (model matematic, scheme bloc) în structuri automate. Astfel, în teză se consideră că datorită caracterului neinerțial al dependenței  $I(V)$  și a faptului că o caracteristică este definită pentru o pereche de valori ale temperaturii mediului ambiant și intensității radiației solare (parametrii caracteristicii),



din punct de vedere sistemic un model are ca mărimi de intrare tocmai acești parametri și ca mărimi de ieșire caracteristicile externe. În aplicații, în funcție de modul de utilizare, se consideră, după caz, ca mărime de intrare și una dintre cele două variabile ale caracteristicii  $I(V)$ , cealaltă variabilă fiind tratată ca mărime de ieșire (Fig. 2.2-3).

i.b) *Au fost precizate pentru toate modelele de caracteristici externe selectate modalități de extragere de puncte de pe caracteristica  $I(V)$  necesare rezolvării problemelor de identificare a parametrilor modelelor și folosirii modelelor în simulări și în structuri de conducere.*

În esență, problema extragerii în determinarea valorii lui  $V$  în funcție de valoarea lui  $I$  sau invers. Pentru modele empirice, M-1D și modelele interpolative exprimarea lui  $I$  în funcție de  $V$  sau invers nu constituie o problemă. Dificultatea apare la M-1De și M-2D datorită ecuațiilor transcendente (2.2-10) și (2.2-14), de tip Lambert, la care conduc aceste modele, ecuații nerezolvabile analitic. În acest scop în paragraful 2.5. se prezintă pentru M-2D o metodă de extragere bazată pe considerarea unui sistem dinamic stabil, care în regim staționar conduce la modelul neinerțial M-2D și implementarea acestuia prin modelul Simulink din Fig. 2.5-1. Sistemul dinamic asigură evitarea efectului de buclă algebrică. Cazul M-1D se tratează prin particularizarea cazului M-2D.

i.c) *Au fost elaborate instrumente de identificare a parametrilor modelelor parametrice ale dispozitivelor fotovoltaice, pe bază de caracteristici  $I(V)$  sau  $P(V)$  determinate experimental, folosind algoritmi genetici și s-au delimitat, pe baza unui studiu comparativ, domeniile de utilizare ale diferitelor metode.*

Metoda prezentată urmărește, folosind diferite criterii, reducerea diferențelor dintre o caracteristică măsurată și modelul acesteia (2.6.1). Sunt luate în considerare 3 variante de funcții fitness, două pentru caracteristici  $I(V)$  ((2.6-1),(2.6-2)) și una pentru caracteristici  $P(V)$  (2.6-3). Cazul cel mai complex de aplicare corespunde M-2D (2.6.2) pentru care, folosind algoritmi genetici, se determină, 7 parametri sau numai 5 (atunci când se folosesc relații de legătură) ori trei (atunci când doi dintre parametri se estimează cu formulele de aproximare din fizică). În majoritatea determinărilor am lucrat cu 5 parametri. Pentru modelele empirice folosirea algoritmilor genetici (2.6.3), ca alternativă la metodele de regresie cunoscute. În acest caz se determină 2 parametri pentru M-E1, M-E2, respectiv un parametru pentru M-E3. Rezultatele obținute sunt comparate în două cazuri concrete și sunt folosite pentru a sintetiza observații utile utilizatorilor (2.7).

ii) Necesitatea testării rapide în condiții de laborator a dispozitivelor de comandă ale sistemelor cu dispozitive fotovoltaice, în particular a sistemelor de tip MPPT, justifică realizarea unui emulator de panouri fotovoltaice. Principala cerință este ca emulatorul să genereze cu o precizie rezonabilă și o inerție cât mai redusă caracteristicile  $I(V)$  ale unui panou fotovoltaic real în funcție de parametri  $G$  și  $\theta$ . Problema a fost tratată în capitolul 3 obținându-se următoarele rezultate:

ii.a) *A fost realizat un studiu cu privire la tipurile de modele folosite pentru emulatoare și cu privire la realizarea fizică a unui emulator în urma căruia a fost adoptată o soluție bazată pe folosirea unei surse de c.c. programabile (3.1).*

Cu toate că majoritatea emulatoarelor prezentate în literatură folosesc modelele M-1D și M-1De, în teză se folosește datorită preciziei de modelare modelul M-2D. În urma analizei a trei posibilități (sinteza apare în tabelul

3.1), ca variantă de realizare fizică a emulatorului a fost aleasă o soluție bazată pe *utilizarea unei singure surse de tensiune de curent continuu programabilă, controlată printr-un bloc de reglare* (Fig. 3.1-3).

ii.b) *S-a propus o structură de implementare a emulatorului pentru care a fost dezvoltat un model matematic.*

Varianta propusă folosește o sursă de tensiune programabilă de tip EXTECH 382280 împreună cu o placă dSPACE. Analiza acesteia s-a făcut sub aspectul principiului de funcționare al emulatorului, a limitărilor sursei programabile, a modului de achiziție al datelor și a modului de comandă al sursei (3.2.1). Caracteristica  $I(V)$  a fost obținută cu ajutorul unui bloc Lookup Table cu 3 intrări,  $\theta$ ,  $G$ ,  $I_{PV\_P}$ , și o ieșire,  $V_{PV\_P}$ . Din punct de vedere sistemic emulatorul reprezintă un sistem de reglare în buclă închisă cu rolul de a menține punctul de funcționare pe caracteristica de parametrii  $\theta$  și  $G$  în punctul corespunzător rezistenței de sarcină  $R_L$ .

Având în vedere că sursa programabilă EXTECH 382280 a trebuit să fie tratată ca un black-box, s-a procedat la o modelare și identificare experimentală a ansamblului generator programabil - sarcină (3.2.2). A rezultat un model neliniar, invariant în raport cu rezistența de sarcină, caracterizat atât de o temporizare de ordinul I, cât și de un timp mort care în faza de sinteză poate fi neglijat (3.2.2). Modelul complet al emulatorului, considerat ca sistem de reglare, este stabilit atât în varianta de sistem în timp continuu, corespunzătoare unei surse programabile ideale, cât și în varianta de sistem în timp discret, corespunzătoare posibilității reale de utilizare a sursei programabile (3.2.3).

ii.c) *S-a analizat stabilitatea emulatorului de panou fotovoltaic propus (3.3).*

Pentru studiul stabilității a fost necesară reconfigurarea schemei bloc astfel încât să se poată aplica criteriul de stabilitate absolută al lui Popov pentru modelul în timp continuu și criteriul lui Tâpkin pentru modelul în timp discret. Metoda imaginată ia în considerare modificarea punctului de funcționare în raport cu valoarea rezistența de sarcină. Pentru varianta timp continuu emulatorul este teoretic stabil pe întreaga caracteristică externă, pe când pentru varianta timp discret trebuie exclusă o vecinătate nesemnificativă a punctului de scurtcircuit al caracteristicii  $I(V)$ .

ii.d) *S-a studiat experimental varianta discretă (reală) de emulator de panou fotovoltaic (3.4).*

Pentru validarea emulatorului au fost realizate 3 categorii de experimente:

- A. experimente de verificare a preciziei de implementare a caracteristicilor externe dorite;
- B. experimente pentru verificarea comportării emulatorului la variații ale radiației solare și temperaturii mediului ambiant;
- C. experimente privind comportarea emulatorului la variații ale rezistenței de sarcină.

Experimentele din categoria A au fost experimente de regim permanent constant efectuate pentru rezistențe de sarcină constante. Erorile de implementare a caracteristicilor dorite au fost de valoare medie sub 1.5 % și s-au situat în plaja [0.25 %, 4.19 %]. Experimentele din categoria B au cuprins scenarii dinamice cu variații lente, de ordinul minutelor, separate

sau simultane, ale intensității radiației solare și temperaturii ambiante pentru rezistențe de sarcină constante și diferite valori ale parametrilor blocului compensator. Pentru variații lente ale parametrilor în raport cu pasul de discretizare de 0.1 secunde al sursei programabile, erorile s-au încadrat în plajele din cazul A. Experimente de tipul B, s-au efectuat și folosind două surse programabile identice, conectate în serie, comandate cu același semnal (Anexa 3.4). Rezultatele au fost similare celor din cazul folosirii unei singure surse programabile. În cazul experimentelor din categoria C s-a urmărit efectul scurtcircuitării parțiale a rezistenței de sarcină sau a variației continue dar rapide a acesteia. Concluzia rezultată a fost aceea că astfel de variații nu sunt relevante în raport cu variațiile diurne ale parametrilor. Pentru atenuarea oscilațiilor care apar în procesele tranzitorii ale emulatorului cauzate de variația sarcinii în vecinătatea unor puncte de funcționare s-a încercat amortizarea lor prin introducerea unui compensator suplimentar, de tip  $PDT_1$  în schema emulatorului (Fig. 3.4-23 și Anexa 3.5). Efectul a fost însă redus.

iii) Exploatarea rațională a sistemelor cu panouri fotovoltaice corespunde funcționării acestora în punctul de putere maximă (MPP) sau în vecinătatea acestora. Acest deziderat este în prezent îndeplinit prin structuri de reglare denumite sisteme de urmărire a punctului de putere maximă (MPPT) care sunt în fond sisteme de reglare extremale. Totodată, dezideratul poate fi împlinit prin structuri de reglare cărora să li se prescrie coordonatele MPP prin semnalele de referință generate de modele de tip interpolativ având ca intrări intensitatea radiației solare și temperatura ambiantă. Soluția reprezintă o alternativă la metodele MPPT în regimurile în care precizia acestora este scăzută. Capitolul 4 a fost destinat acestei de a doua abordări, cercetarea conducând la următoarele rezultate:

iii.a) A fost prezentat modul de determinare a MPP pentru modelele parametrice din cadrul capitolului 2 în ipoteza că parametri lor sunt cunoscuți.

Pentru M-1D (4.2.1.1), M-E1 (4.2.1.4), M-E2 (4.2.1.5) și M-E3 (4.2.1.6) au fost stabilite formule de calcul. Pentru M-2D (și M-1De considerat caz particular al M-2D) datorită caracterului implicit al ecuațiilor transcendente coordonatele MPP pot fi determinate doar numeric. Pentru rezolvarea ecuațiilor transcendente a fost imaginată o metodă bazată pe asocierea unui sistem dinamic neliniar de ordinul II care în regim permanent constant se stabilizează într-un punct care are tocmai coordonatele MPP (4.2.1.3). Implementarea s-a făcut prin modelul Simulink din Fig. 4.2-2. Modul de operare a fost ilustrat folosind mai multe scenarii.

iii.b) S-au încadrat metodele de tip MPPT în categoria sistemelor de reglare extremale și s-a subliniat posibilitatea utilizării acestor structuri pentru determinare de coordonate ale MPP (4.2.2).

S-a argumentat încadrarea metodei „Perturbă și Observă” și a metodei „Conductanță incrementală” în „sistemele extremale pas cu pas”, respectiv „sistemele extremale cu controlul derivatei”. De asemenea, folosind un caz de structură destinată MPPT, preluat din literatură, s-a arătat cum pot fi extrase coordonatele MPP.

iii.c) S-a prezentat o metodă de sinteză a modelelor de tip interpolativ  $I_{MPP}(\theta, G)$ ,  $V_{MPP}(\theta, G)$  și  $P_{MPP}(\theta, G)$  (4.3).

Problema sintezei modelelor de tip interpolativ constă în generarea de tabele de interpolare plecând de la un număr redus de puncte de sprijin obținute analitic, numeric sau experimental. Metoda elaborată se bazează pe metoda de interpolare globală a lui Shepard și este ilustrată prin intermediul unui studiu de caz în care se presupun cunoscute 7 caracteristici  $I(V)$  determinate experimental (4.3.1). Modelele interpolative, implementate prin blocuri de tip Lookup Table. Soluția propusă a fost validată folosind caracteristicile determinate prin metoda Tsuno (4.3.3). Metoda poate fi rafinată, în ideea reducerii diferențelor relativ mici care apar pentru valorile mari ale temperaturii ambiante și valori mici ale intensității radiației solare prin modificarea adecvată a ponderilor folosite în formula de interpolare globală. Întrucât intensitatea radiației solare nu se poate măsura direct, pentru implementarea practică a modelelor de interpolare se folosesc, suplimentar, estimatoare bazate pe măsurarea mai multor mărimi (4.3.2).

iii.d) *S-a elaborat un studiu de caz referitor la un sistem de conducere cu mărimi de referință generate prin modele interpolative (4.4).*

Studiul de caz a necesitat, într-o primă etapă, elaborarea modelelor matematice pentru ansamblul panou fotovoltaic – convertor DC-DC – sarcină. S-a avut în vedere atât varianta cu convertor Buck (4.4.1) cât și varianta cu convertor Boost (4.4.2). Elementul specific al modelării l-a constituit utilizarea pentru panoul fotovoltaic a unui model de tip interpolativ care redă cu aproximație bună caracterului de generator de curent neliniar al panoului. Verificarea modelelor s-a făcut folosind mediul Matlab/Simulink și mai multe scenarii de validare. Pe baza modelelor menționate, într-o a doua etapă s-a analizat comportarea unei structuri de reglare a tensiunii de la bornele unui panou fotovoltaic (convertor Buck comandat de un regulator PI cu ARW implementat în variantă de sistem în timp discret) folosind referința de tensiune obținută prin interpolare (4.4.3). Rezultatele obținute pentru scenarii acoperitoare pentru variația intensității radiației solare în cazuri reale) susțin aplicabilitatea principiului.

## 5.2 Contribuții personale

Contribuțiile personale ale autorului tezei în contextul obiectivelor și rezultatelor prezentate în paragraful anterior au fost:

i.a) Sistemizarea problemei modelării matematice a caracteristicii  $I(V)$  (caracteristică externă) a dispozitivelor fotovoltaice și prezentarea unitară a 7 modele matematice (3 modele bazate pe scheme electrice echivalente, 3 de tipul „model empiric” și unul de tip model interpolativ (sau model numeric)) utilizabile în aplicații cu dispozitive fotovoltaice, în principal în reglarea sistemelor cu panouri fotovoltaice și realizarea de emulatoare.

i.b) Elaborarea unei metode de extragere de puncte din caracteristicii  $I(V)$  a unui dispozitiv fotovoltaic modelat printr-o schemă echivalentă cu două diode (M-2D). Metoda soluționează ecuația transcendentă, nerezolvabilă analitic, care apare în acest context (2.2-14). Pentru rezolvare modelului M-2D ecuației i s-a asociat un sistem dinamic neliniar, implementat printr-un model Simulink, a cărui stabilitate a fost demonstrată. Rezultatele au fost publicate în articolul [Petcuț 2010a].

i.c) Elaborarea unei metode de identificare a parametrilor modelelor caracteristicii  $I(V)$  a dispozitivelor fotovoltaice cu ajutorul algoritmilor genetici,

utilizarea ei în cazul modelelor empirice M-E1, M-E2, M-E3 și în cazul M-2D, realizarea unui studiu comparativ cu privire la precizia de modelare între metoda de determinare a parametrilor cu ajutorul algoritmilor genetici și o altă metodă numerică folosită în literatură. Rezultatele au fost comunicate și publicate prin lucrările [Petcuț 2010a], [Dragomir 2010a].

ii.a) Imaginarea și realizarea unui emulator de caracteristici  $I(V)$  folosind *un model interpolativ de dispozitiv fotovoltaic implementat pe un suport adecvat și o sursă tensiune de curent continuu programabilă, controlată printr-un bloc de reglare*. Practic am folosit o sursă de tensiune programabilă de tip EXTECH 382280 comandată cu ajutorul unei plăci dSPACE.

ii.b) Analizarea stabilității emulatorului atât prin folosirea de modele în timp continuu și a criteriului Popov, cât și prin folosirea de modele în timp discret și a criteriului Țipkin.

ii.c) Studiul experimental a comportării emulatorului de panou fotovoltaic în vederea analizării și explicării performanțelor acestuia. Pentru validare am realizat 3 categorii de experimente care au vizat: precizia de implementare a caracteristicilor externe dorite, verificarea comportării emulatorului la variații ale radiației solare și temperaturii mediului ambiant și comportarea emulatorului la variații ale rezistenței de sarcină.

iii.a) Sistematizarea modului de determinare a coordonatelor punctului de putere maximă (MPP) de pe caracteristica externă a unui dispozitiv fotovoltaic și elaborarea unei metode de determinare a MPP pentru M-2D, pe baza rezolvării sistemului de ecuații transcendente ce apar cu ajutorul unui sistem dinamic neliniar de ordinul II, asociat, implementat printr-un model Simulink. Metoda a fost prezentată de autor în lucrarea [Dragomir 2010b].

iii. b) Argumentarea încadrării metodei „Perturbă și Observă” și a metodei „Conductanță incrementală” în categoria „sistemelor extreme pas cu pas”, respectiv „sistemelor extreme cu controlul derivatei” și sublinierea posibilității de utilizare a acestor structuri pentru obținerea coordonatelor MPP.

iii.c) Elaborarea unei metode de generare prin interpolare globală de tip Shepard a coordonatelor MPP,  $I_{MPP}$ ,  $V_{MPP}$  și  $P_{MPP}$ , în funcție de temperatura ambiantă și intensitatea radiației solare ( $\theta$  și  $G$ ) folosind un număr redus de caracteristici  $I(V)$ . Metoda a apărut în lucrarea [Dragomir 2010c]. Măsurarea  $\theta$  și  $G$  la nivelul panoului fiind dificilă, practic se măsoară: temperatura aerului, intensitatea radiației globale, intensitatea radiației difuze, orientarea panoului și poziția Soarelui față de panou, iar  $\theta$  și  $G$  se estimează. Soluția a fost publicată în lucrarea [Korodi 2011]. Validarea generării s-a făcut folosind caracteristici obținute prin interpolare multiplă realizată pe baza metodei Tsuno.

iii.d) Propunerea și studiul prin simulare, a utilizării generatoarelor de coordonate ale MPP în funcție de  $\theta$  și  $G$  ca blocuri de generare a mărimilor de referință pentru reglarea sistemelor cu panouri fotovoltaice. Studiul a necesitat, pe de-o parte, elaborarea modelelor matematice ale ansamblului panou fotovoltaic – convertor DC-DC (Buck sau Boost)– sarcină, utilizarea pentru panoul fotovoltaic a unui model de tip interpolativ și verificarea modelelor cu ajutorul mai multor scenarii de validare, iar pe de altă parte adoptarea unei structuri de reglare cu convertor Buck comandat de un regulator PI cu ARW implementat în variantă de sistem în

timp discret și verificarea comportării structurii de reglare pentru scenarii de variație diurnă a intensității radiației solare.

Pentru elaborarea tezei de doctorat au fost folosite un număr de 121+8 referințe bibliografice.

Pe parcursul stagiului doctoral am publicat 5 lucrări științifice și am redactat 2 rapoarte de cercetare [Petcuț 2010b] și [Petcuț 2011]. Încă o lucrare este în curs de publicare.

Rapoartele de cercetare au fost folosite pentru redactarea lucrărilor:

- [Petcuț 2010a] - CEAI – (ISI și Scopus),
- [Dragomir 2010a] - AQTR 2010, (Xplore și Scopus),
- [Dragomir 2010b] - SOFA 2010, (Xplore și Scopus),
- [Dragomir 2010c],
- [Korodi 2011] - MED 2011, Grecia, (Xplore și Scopus),
- [Dragomir 2012] - în curs de publicare într-o colecție de articole, (Springer).

### **5.3 Direcții de dezvoltare și cercetare generate de teză**

Principalele direcții de dezvoltare și cercetare generate de prezenta teză de doctorat sunt, în opinia autorului tezei, următoarele:

- Folosirea modelelor matematice, parametrice și neparametrice, studiate în teză pentru realizarea de toolbox-uri care să faciliteze utilizarea lor în aplicații predefinite (identificare, extragere de puncte, determinarea MPP) sau în aplicații configurabile (calculul circuitelor electrice, simularea comportării circuitelor, studiul sistemelor de reglare).
- Realizarea de emulatoare de dispozitive fotovoltaice ca echipamente de laborator pe baza structurii propuse în teză, în variante care să înglobeze elemente de măsurare a temperaturii ambiante și intensității radiației solare și care să permită încărcarea automată a interpolatoarelor cu puncte de sprijin.
- Dezvoltarea de cercetări privind: sinteza de structuri de reglare a sistemelor cu panouri fotovoltaice bazate pe folosirea generatoarelor de coordonate ale MPP și utilizarea generatoarelor pentru predicția puterii produse de dispozitivele fotovoltaice în funcție de prognoza meteo.

## **ANEXE**

## Anexa 2.1 Codul sursă pentru extragerea parametrilor cu ajutorul algoritimilor genetici.

Codul pentru determinarea parametrilor dispozitivului fotovoltaic este scris în Matlab pe baza ordinogramei prezentate în Fig. 2.6-1. Pentru simplificarea scrierii codului precum și pentru a putea realiza o testare corespunzătoare, am folosit un program principal din care am apelat o funcție dedicată pentru fiecare operație.

Programul principal utilizat pentru determinarea parametrilor unui dispozitiv fotovoltaic, în particular ai unei celule fotovoltaice are următorul cod:

```
clear
format long

%1)Inițializare parametrilor

    %Alegerea parametrilor nominali
    al_param

%2)Generarea populației inițiale de  $q$  indivizi

    %Generarea punctelor de pe caracteristica nominală,  $I(V)$ 
    car_nom

    %Generarea populației pentru prima generație ( $G1$ )
    gen_init

%verificare atingere  $N_{max}$ 
for qq1=1:(Nmax+1)

    %3)Generare prin puncte a caracteristici  $I(V)$  pentru fiecare individ din
    generația curentă

        for j=2:21
            gen_car
        end

    %4)Calcularea fitness-ului pentru fiecare individ din generația curentă

        for j=2:21
            fit(j)=IWj(j)-IW(1)% sau altă funcție fitness
        end

    %5)Ordonarea generației curente

        ordonare

    %6)Construirea noii generații

        gen_nou

end

%STOP și afișare rezultate

afis_rez
```



În continuare se prezintă funcțiile apelate în programul principal:

- Funcția *Alegere parametri nominali* **al\_param**:

```
format long
A=5*2.5;%suprafata celulei
temp=25;%temperatura de lucru estimata
n1(1)=1;%factorul de idealitate al diodei D1
n2(1)=2;%factorul de idealitate al diodei D2
I0(1)=A*n1(1)*10^-11;
I02(1)=A*n2(1)*10^-9;
Vt=1.38*(temp+273)/(1.6*10000);
%Valorile tensiunii corespunzatoare celor 12 puncte de pe caracteristica I(V)
v=[0 .1 .2 .3 .35 .4 .45 .475 .5 .525 .55 .565];
Rs(1) = 0.2;
%Rsh(1)=10; initializat sau calculat din Voc si Isc
T=0.1;
Voc=0.565;%Tensiunea de mers in gol
Isc=0.45;%Curentul de scurt circuit
index_er=0;
```

- Funcția *generare caracteristică nominală I(V)* **car\_nom**:

```
%Introducerea curentului corespunzator tensiunii salvate in v
IW=[.45 .44 .426 .4075 .396 .385 .354 .318 .26 .181 .081 .001];
IW0=IW;
plot(v,IW,'r')
hold on;
```

- Funcția *generare populația inițială* **gen\_init**:

```
format long
j=1;
Rsh(j)=(Voc-(Isc*Rs(j)))/
    /(Isc-I0(j)*(exp(Voc/(n1(j)*Vt))-exp(Isc*Rs(j)/(n1(j)*Vt)))-
    -I02(j)*(exp(Voc/(n2(j)*Vt))-exp(Isc*Rs(j)/(n2(j)*Vt))))
il(j)=I0(j)*(exp(Voc/(n1(j)*Vt))-1)+I02(j)*
    *(exp(Voc/(n2(j)*Vt))-1)+Voc/Rsh(j)

for j=2:21
n1(j)=n1(1)*(1+0.1*(rand(1,1)-0.1))
n2(j)=n2(1)*(1+0.1*(rand(1,1)-0.1))

I0(j)=I0(1)*(1+0.1*(rand(1,1)-0.5))
I02(j)=I02(1)*(1+0.1*(rand(1,1)-0.5))

Rs(j) = Rs(1)*(1+0.1*(rand(1,1)-0.5))

Rsh(j)=(Voc-(Isc*Rs(j)))/
    /(Isc-I0(j)*(exp(Voc/(n1(j)*Vt))-exp(Isc*Rs(j)/(n1(j)*Vt)))-
    -I02(j)*(exp(Voc/(n2(j)*Vt))-exp(Isc*Rs(j)/(n2(j)*Vt))))

il(j)=I0(j)*(exp(Voc/(n1(j)*Vt))-1)+I02(j)*
    *(exp(Voc/(n2(j)*Vt))-1)+Voc/Rsh(j)
end

il_max=1.001*il(1);
il_min=0.999*il(1);

I0_max=1.4*I0(1);
```

```

I0_min=0.6*I0(1);

I02_max=1.4*I02(1);
I02_min=0.6*I02(1);

Rs_max=1.4*Rs(1);
Rs_min=0.6*Rs(1);

Rsh_max=1.4*Rsh(1);
Rsh_min=0.6*Rsh(1);

n1_max=1.2*n1(1);
n1_min=0.8*n1(1);

n2_max=1.2*n2(1);
n2_min=0.8*n2(1);

```

- Funcția *generare caracteristică I(V)* **gen\_car**:

```

figure
%Se apelează schema Simulink pentru trasarea unei caracteristici I(V)
corespunzătoare unor parametrii dați
sim('Cel_solara_bun_v')
    IW=IW(8:19) %Elimină punctele obținute înainte de prima stabilizare.
    Punctele sunt extrase la fiecare 0.1 secunde.
    plot(v,IW,'*r')
    hold on;
IWj(j)=sum(IW);

```

Practic în această funcție se apelează schema Simulink pentru generarea caracteristicii I(V). Și aici se folosește aceleși valori ale tensiunii ca și la inițializare:

```
v=[0 .1 .2 .3 .35 .4 .45 .475 .5 .525 .55 .565];
```

- Funcția *ordonare după fitness* **ordonare**:

```

[B,IX] = sort(fit,'ascend');
n1=n1(IX);
n2=n2(IX);
il=il(IX);
I0=I0(IX);
I02=I02(IX);
Rsh=Rsh(IX);
Rs=Rs(IX);
fit=fit(IX);

```

- Funcția *generație nouă* **gen\_nou**:

```

%păstrăm cei mai performanți 10 indivizi
n1_n=n1(1:11);
n2_n=n2(1:11);
il_n=il(1:11);
I0_n=I0(1:11);
I02_n=I02(1:11);
Rsh_n=Rsh(1:11);
Rs_n = Rs(1:11);

%obținerea a 10 indivizi cu ajutorul algoritmilor genetici
q=11;
gen_nou
ruleta % selectie de tip ruleta

```

```

nr_p=1;
mutatie
ruleta % selectie de tip ruleta
nr_p=1;
mutatie
ruleta % selectie de tip ruleta
nr_p=2;
mutatie
ruleta % selectie de tip ruleta
nr_p=2;
mutatie
ruleta % selectie de tip ruleta
nr_p=3;
mutatie
ruleta % selectie de tip ruleta
nr_p=3;
mutatie
ruleta % selectie de tip ruleta
nr_p=4;
mutatie
ruleta % selectie de tip ruleta
nr_p=4;
mutatie
ruleta % selectie de tip ruleta
incrucisare
ruleta % selectie de tip ruleta
incrucisare

%salvarea populatie
il_n;
il=il_n;
I0=I0_n;
I02=I02_n;
Rsh=Rsh_n;
Rs=Rs_n;
n1=n1_n;
n2=n2_n;

```

Funcția `gen_nou` generează o populație inițială de 20 de indivizi plecând de la valorile parametrilor de la generația anterioară.

- Funcția *selectie de tip ruletă ruleta*:

```

aux=sum(fit)-fit(1);
numar(1)=0;
for j=2:21
    numar(j)=numar(j-1)+fit(j)/aux;
end

selectie=rand(1);
sel=2;
while(selectie>numar(sel))
    sel=sel+1;
end
sel;

```

- Funcția *încrucisare incrucisare*:

```

sell=sel;
ruleta

```

```

sel2=sel;
q=q+1;
if n1(sel1)>n1(sel2)
    sel=sel1;
    sel1=sel2;
    sel2=sel;
end
n1_n(q)=n1(sel1)*0.75+(n1(sel2)*1.25-n1(sel1)*0.75)*rand(1);
if n2(sel1)>n2(sel2)
    sel=sel1;
    sel1=sel2;
    sel2=sel;
end
n2_n(q)=n2(sel1)*0.75+(n2(sel2)*1.25-n2(sel1)*0.75)*rand(1);
if I0(sel1)>I0(sel2)
    sel=sel1;
    sel1=sel2;
    sel2=sel;
end
I0_n(q)=I0(sel1)*0.75+(I0(sel2)*1.25-I0(sel1)*0.75)*rand(1);
if I02(sel1)>I02(sel2)
    sel=sel1;
    sel1=sel2;
    sel2=sel;
end
I02_n(q)=I02(sel1)*0.75+(I02(sel2)*1.25-I02(sel1)*0.75)*rand(1);
if Rs(sel1)>Rs(sel2)
    sel=sel1;
    sel1=sel2;
    sel2=sel;
end
Rs_n(q)=Rs(sel1)*0.75+(Rs(sel2)*1.25-Rs(sel1)*0.75)*rand(1);
Rsh_n(q)=(Voc-(Isc*Rs_n(q)))/
    /(Isc-I0_n(q)*(exp(Voc/(n1_n(q)*Vt))-exp(Isc*Rs_n(q)/(n1_n(q)*Vt)))-
    -I02_n(q)*(exp(Voc/(n2_n(q)*Vt))-exp(Isc*Rs_n(q)/(n2_n(q)*Vt))));
if Rsh_n(q)<0
    index_er=index_er+1
    q=q-1;
    ruleta
    incrucisare
end
il_n(q)=I0_n(q)*(exp(Voc/(n1_n(q)*Vt))-1)+
    +I02_n(q)*(exp(Voc/(n2_n(q)*Vt))-1)+Voc/Rsh_n(q);
if il_n(q)<0
    index_er=index_er+1
    q=q-1;
    ruleta
    incrucisare
end

```

▪ **Funcția mutație mutație:**

```

q=q+1;
for nn=1:nr_p %alege numarul de variabile "mutate"
    a=5-5*rand;%alege variabila
    b=fix(a);

    if b==0
        I0;
        sel;
        I0_n(q)=I0_min+(I0_max-I0_min)*rand(1);
    end
end

```

```

        %il_n(q)=il(sel);
        I02_n(q)=I02(sel);
        %Rsh_n(q)=Rsh(sel);
        Rs_n(q) = Rs(sel);
        n1_n(q)=n1(q);
        n2_n(q)=n2(q);
    end
    if b==1
        I02;
        sel;
        I02_n(q)=I02_min+(I02_max-I02_min)*rand(1);
        %il_n(q)=il(sel);
        I0_n(q)=I0(sel);
        %Rsh_n(q)=Rsh(sel);
        Rs_n(q) = Rs(sel);
        n1_n(q)=n1(q);
        n2_n(q)=n2(q);
    end
    if b==2
        Rs;
        sel;
        Rs_n(q)=Rs_min+(Rs_max-Rs_min)*rand(1);
        %il_n(q)=il(sel);
        I0_n(q)=I0(sel);
        I02_n(q)=I02(sel);
        %Rsh_n(q)=Rsh(sel);
        n1_n(q)=n1(q);
        n2_n(q)=n2(q);
    end
    if b==3
        n1;
        sel;
        n1_n(q)=n1_min+(n1_max-n1_min)*rand(1);
        %il_n(q)=il(sel);
        I0_n(q)=I0(sel);
        I02_n(q)=I02(sel);
        %Rsh_n(q)=Rsh(sel);
        Rs_n(q) = Rs(sel);
        n1_n(q)=n1(q);
        n2_n(q)=n2(q);
    end
    if b==4
        n2;
        sel;
        n2_n(q)=n2_min+(n2_max-n2_min)*rand(1);
        %il_n(q)=il(sel);
        I0_n(q)=I0(sel);
        I02_n(q)=I02(sel);
        %Rsh_n(q)=Rsh(sel);
        Rs_n(q) = Rs(sel);
        n1_n(q)=n1(q);
    end
    Rsh_n(q)=(Voc-(Isc*Rs_n(q)))/
        /(Isc-I0_n(q)*(exp(Voc/(n1_n(q)*Vt))-exp(Isc*Rs_n(q)/(n1_n(q)*Vt)))-
        -I02_n(q)*(exp(Voc/(n2_n(q)*Vt))-exp(Isc*Rs_n(q)/(n2_n(q)*Vt))));
    if Rsh_n(q)<0
        index_er=index_er+1
        q=q-1;
        ruleta
        mutatie
    end
    il_n(q)=I0_n(q)*(exp(Voc/(n1_n(q)*Vt))-1)+

```

```
        +I02_n(q)*(exp(Voc/(n2_n(q)*Vt))-1)+Voc/Rsh_n(q);  
if il_n(q)<0  
    index_er=index_er+1  
    q=q-1;  
    ruleta  
    mutatie  
end  
end  
end
```

▪ Funcția *afișare rezultate afis\_rez*:

```
clc  
format short  
Voc=0.56;  
Isc=0.45;  
index_er  
%Caracteristică de referință cea mai performantă  
figure  
hold on  
car_nom  
for j=2:2  
    gen_car  
end  
grid
```

### Anexa 3.1 Utilizarea blocului Lookup-Table din cadrul mediului Matlab-Simulink pentru emularea unei caracteristici $I(V)$ a unui dispozitiv fotovoltaic.

În cadrul acestei anexe se prezintă modul în care s-a implementat familia de caracteristici externe generabile cu emulatorul de dispozitiv fotovoltaic cu structura din Fig. 3.2-1, folosind cu funcția de interpolator un blocul Lookup-Table din mediul Matlab-Simulink. Setările au fost făcute astfel încât blocul Lookup-Table să furnizeze valoarea tensiunii  $V_{PV\_P}$  (valoare de sprijin) în funcție de mărimile de intrare  $(\theta, G, I_{PV\_P})$  (loc de sprijin) potrivit următoarei legături: punctul de funcționare  $(I_{PV\_P}, V_{PV\_P})$  se găsește pe caracteristica externă de parametri  $\theta$  și  $G$  precizați prin locul de sprijin.

Blocul Lookup-Table din Matlab-Simulink are posibilitatea de a opera după următoarele metode de interpolare: None (Flat) - practic nu folosește interpolarea, Liniară și Cubic spline.

Ca date de intrare s-a considerat că dispozitivul emulat este definit prin cele 16 caracteristici  $I(V)$  prezentate în Fig. 2.1-2, corespunzătoare la 4 valori ale intensității radiației solare,  $G = 400, 600, 800, 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , și la 4 valori ale temperaturii mediului ambiant,  $\theta = 10, 25, 40, 60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Configurarea blocului Lookup-Table s-a realizat prin parcurgerea următorilor pași:

i) S-a considerat că fiecare dintre cele 16 caracteristici poate fi descrisă prin

modelul M2-D de ecuație 
$$I = I_{ph} - I_{01} \cdot \left( e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T1}}} - 1 \right) - I_{02} \cdot \left( e^{\frac{V+I \cdot R_S}{V_{T2}}} - 1 \right) - \frac{V+I \cdot R_S}{R_p}$$
 și printr-un

număr de 25 de puncte  $(I, V)$ . Folosind metoda bazată pe algoritmi genetici, prezentată în paragraful 2.6.1, au fost determinați cei 7 parametri ai celor 16 caracteristici.

ii) S-au ales, practic aleatoriu, 14 dintre cele 16 caracteristici și au fost introduse punctele de sprijin corespunzătoare în blocul Lookup-Table.

iii) S-a studiat calitatea metodelor de interpolare mai sus menționate. În fiecare caz au fost generate puncte după cum urmează:

a) S-au generat valori ale tensiunii corespunzătoare unor puncte de pe cele 14 caracteristici selectate și unor valori ale curenților diferite de cele corespunzătoare punctelor de sprijin. Apoi s-au comparat rezultatele obținute prin interpolare cu valori ale tensiunilor obținute pe baza modelelor parametrice de la punctul i) folosind metoda prezentată în paragraful 2.6.1.

b) S-au generat valori ale tensiunilor de pe cele 2 caracteristici neutilizate, pentru valori ale curenților din punctele de sprijin ale acestora și s-au comparat rezultatele obținute prin interpolare cu valori ale tensiunilor obținute pe baza modelelor parametrice de la punctul i) folosind metoda prezentată în paragraful 2.6.1.

iv) S-a reluat punctul iii) pentru alte 3 seturi de 14 caracteristici selectate aleatoriu din cele 16.

În urma testelor de mai sus s-a constatat că erorile de comparare nu au depășit 3.5%. Cele mai reduse valori s-au înregistrat în cazul când s-a folosit metoda de interpolare liniară.

Pe această bază pentru implementare s-au folosit toate cele 16 caracteristici cu o granularizare de 51 puncte pe caracteristică  $I_{pv,p} \in \{0, 0.1, 0.2, \dots, 4.9, 5\}A$  și ca metodă de interpolare, interpolarea liniară. Cele 816 = 4·4·51 puncte de sprijin (v. tabelul de date A3.1-1) au fost salvate corespunzător blocului de parametrizare din Fig. A3.1-1, folosind pentru valorile curentului tabelul de date salvat în variabila *tti800*.

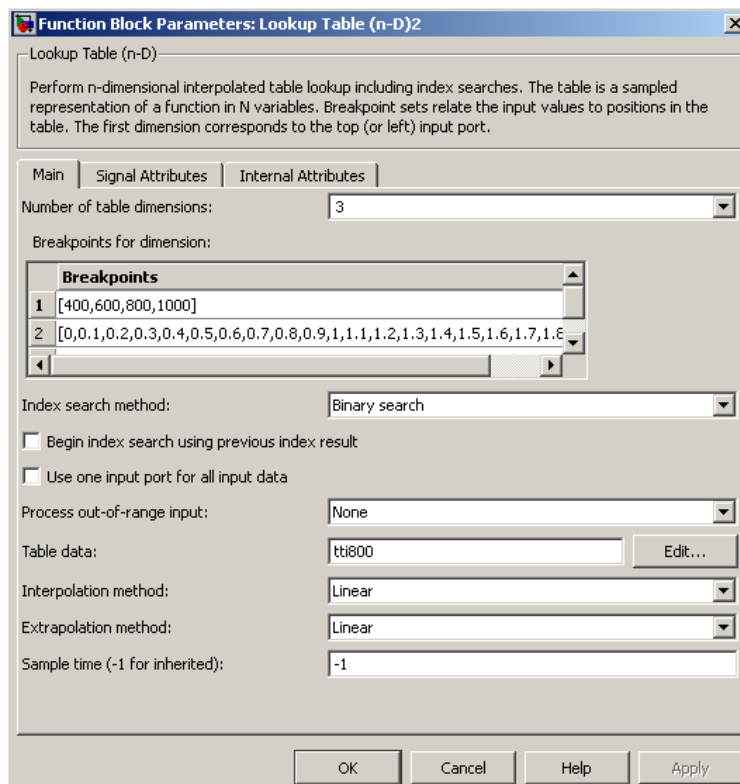


Fig. A3.1-1. Setare tabel de interpolare

Ulterior implementării caracteristicilor dispozitivului fotovoltaic sub forma prezentată, autorul a accesat lucrările [Marion 2004] și [Tsuno 2009], importante în contextul de față prin faptul că promovează interpolarea sub forma modelelor interpolative prezentate în paragraful 2.4. Aceste metode nu au fost folosite în studiul de față întrucât, pe de-o parte, preluarea lor nu ar fi adus nimic nou în ceea ce privește principiul de realizare a emulatorului, iar pe de altă parte ar fi necesitat conceperea unui interpolator de tip special. Este posibil ca precizia de modelare să fie mai bună, dar consemnarea unui astfel de avantaj reprezintă, în sine, o nouă temă de studiu.



Tabel A3.1-1-1: Lookup Table (3-D)

a) Punctele de sprijin ale caracteristicilor  $V_{PV,P}(\theta, G, I_{PV,P})$  pentru  $\theta = 10^\circ\text{C}$

$I_{PV,P}$ G	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
400	22	21.95	21.83	21.70	21.55	21.35	21.20	20.95	20.75	20.45	20.20	19.90	19.55	19.15	18.70	18.10	17.45	16.55	15.20	13.20	9.20	-100	-101	-102	-103	-104
600	22.50	22.47	22.45	22.40	22.30	22.20	22.10	22	21.90	21.80	21.70	21.60	21.50	21.40	21.25	21.10	20.90	20.80	20.60	20.40	20.20	19.90	19.60	19.40	18.95	18.50
800	22.90	22.85	22.80	22.75	22.70	22.65	22.60	22.55	22.50	22.45	22.40	22.35	22.30	22.20	22.10	22	21.95	21.90	21.80	21.75	21.65	21.60	21.45	21.35	21.25	21.10
1000	23.20	23.18	23.15	23.13	23.10	23.07	23.05	23	22.95	22.90	22.85	22.80	22.75	22.70	22.65	22.60	22.55	22.50	22.45	22.40	22.35	22.30	22.25	22.20	22.15	22.10
$I_{PV,P}$ G	2.6	2.7	2.8	2.9	3	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0	
400	-105	-106	-107	-108	-109	-110	-111	-112	-113	-114	-115	-116	-117	-118	-119	-120	-121	-122	-123	-124	-125	-126	-127	-128	-129	
600	17.95	17.20	16.20	14.40	10.20	-100	-101	-102	-103	-104	-105	-106	-107	-108	-109	-110	-111	-112	-113	-114	-115	-116	-117	-118	-119	
800	20.95	20.85	20.65	20.50	20.30	20	19.90	19.60	19.30	18.90	18.45	17.80	16.95	15.40	12.20	-100	-101	-102	-103	-104	-105	-106	-107	-108	-109	
1000	22	21.90	21.80	21.75	21.65	21.55	21.50	21.40	21.30	21.20	21.10	20.90	20.80	20.70	20.45	20.25	20.05	19.70	19.40	19.10	18.60	17.50	16.90	15	0	

b) Punctele de sprijin ale caracteristicilor  $V_{PV,P}(\theta, G, I_{PV,P})$  pentru  $\theta = 25^\circ\text{C}$

$I_{PV,P}$ G	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
400	20.80	20.75	20.62	20.50	20.35	20.15	20	19.75	19.55	19.25	19	18.70	18.35	17.95	17.50	16.90	16.25	15.35	14	12	8	-100	-101	-102	-103	-104
600	21.30	21.27	21.25	21.20	21.10	21	20.90	20.80	20.70	20.60	20.50	20.40	20.30	20.20	20.05	19.90	19.70	19.60	19.40	19.20	19	18.70	18.40	18.20	17.75	17.30
800	21.70	21.65	21.60	21.55	21.50	21.45	21.40	21.35	21.30	21.25	21.20	21.15	21.10	21	20.90	20.80	20.75	20.70	20.60	20.55	20.45	20.40	20.25	20.15	20.05	19.90
1000	21.95	21.90	21.85	21.80	21.77	21.75	21.72	21.70	21.65	21.62	21.60	21.55	21.50	21.45	21.40	21.35	21.30	21.25	21.20	21.15	21.10	21.05	21	20.95	20.90	20.80
$I_{PV,P}$ G	2.6	2.7	2.8	2.9	3	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0	
400	-105	-106	-107	-108	-109	-110	-111	-112	-113	-114	-115	-116	-117	-118	-119	-120	-121	-122	-123	-124	-125	-126	-127	-128	-129	
600	16.75	16	15	13.20	9	-100	-101	-102	-103	-104	-105	-106	-107	-108	-109	-110	-111	-112	-113	-114	-115	-116	-117	-118	-119	
800	19.75	19.65	19.45	19.30	19.10	18.80	18.70	18.40	18.10	17.70	17.25	16.60	15.75	14.20	11	-100	-101	-102	-103	-104	-105	-106	-107	-108	-109	
1000	20.70	20.65	20.60	20.55	20.45	20.35	20.25	20.20	20.10	20	19.80	19.70	19.60	19.40	19.20	19.10	18.80	18.60	18.30	17.95	17.55	17	16.20	14.75	0	

c) Punctele de sprijin ale caracteristicilor  $V_{PV,P}(\theta, G, I_{PV,P})$  pentru  $\theta = 40^\circ \text{C}$

$I_{PV,P}$ G	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
400	19.60	19.55	19.42	19.30	19.15	18.95	18.80	18.55	18.35	18.05	17.80	17.50	17.15	16.75	16.30	15.70	15.05	14.15	12.80	10.80	6.80	-100	-101	-102	-103	-104
600	20.10	20.07	20.05	20	19.90	19.80	19.70	19.60	19.50	19.40	19.30	19.20	19.10	19	18.85	18.70	18.50	18.40	18.20	18	17.80	17.50	17.20	17	16.55	16.10
800	20.50	20.45	20.40	20.35	20.30	20.25	20.20	20.15	20.10	20.05	20	19.95	19.90	19.80	19.70	19.60	19.55	19.50	19.40	19.35	19.25	19.20	19.05	18.95	18.85	18.70
1000	20.85	20.80	20.77	20.75	20.70	20.67	20.65	20.60	20.57	20.55	20.50	20.45	20.40	20.35	20.30	20.27	20.25	20.20	20.15	20.10	20.05	20	19.90	19.80	19.75	19.70
$I_{PV,P}$ G	2.6	2.7	2.8	2.9	3	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0	
400	-105	-106	-107	-108	-109	-110	-111	-112	-113	-114	-115	-116	-117	-118	-119	-120	-121	-122	-123	-124	-125	-126	-127	-128	-129	} $V_{PV,P}$
600	15.55	14.80	13.80	12	7.80	-100	-101	-102	-103	-104	-105	-106	-107	-108	-109	-110	-111	-112	-113	-114	-115	-116	-117	-118	-119	
800	18.55	18.45	18.25	18.10	17.90	17.60	17.50	17.20	16.90	16.50	16.05	15.40	14.55	13	9.80	-100	-101	-102	-103	-104	-105	-106	-107	-108	-109	
1000	19.65	19.60	19.50	19.40	19.35	19.25	19.20	19.10	19	18.90	18.75	18.65	18.50	18.35	18.20	18	17.77	17.55	17.20	16.85	16.50	15.90	15.10	14	0	

d) Punctele de sprijin ale caracteristicilor  $V_{PV,P}(\theta, G, I_{PV,P})$  pentru  $\theta = 60^\circ \text{C}$

$I_{PV,P}$ G	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
400	18.05	18	17.87	17.75	17.60	17.40	17.25	17	16.80	16.50	16.25	15.95	15.60	15.20	14.75	14.15	13.50	12.60	11.25	9.25	5.25	-100	-101	-102	-103	-104
600	18.55	21.27	21.25	21.20	21.10	21	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90
800	18.95	18.90	18.85	18.80	18.75	18.70	18.65	18.60	18.55	18.50	18.45	18.40	18.35	18.25	18.15	18.05	18	17.95	17.85	17.80	17.70	17.65	17.50	17.40	17.30	17.15
1000	19.30	19.25	19.22	19.20	19.15	19.12	19.10	19.07	19.02	19	18.92	18.85	18.80	18.77	18.75	18.72	18.70	18.65	18.60	18.55	18.50	18.40	18.35	18.30	18.25	18.20
$I_{PV,P}$ G	2.6	2.7	2.8	2.9	3	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0	
400	-105	-106	-107	-108	-109	-110	-111	-112	-113	-114	-115	-116	-117	-118	-119	-120	-121	-122	-123	-124	-125	-126	-127	-128	-129	} $V_{PV,P}$
600	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	20.90	
800	17	16.90	16.70	16.55	16.35	16.05	15.95	15.65	15.35	14.95	14.50	13.85	13	11.45	8.25	-100	-101	-102	-103	-104	-105	-106	-107	-108	-109	
1000	18.15	18.10	18	17.80	17.75	17.70	17.65	17.55	17.40	17.35	17.25	17.10	16.95	16.80	16.65	16.45	16.25	16.05	15.70	15.45	15.05	14.55	13.75	11.50	0	

### Anexa 3.2 Experimente cu o sursă programabilă - completare la experimentele prezentate în paragraful 3.2.2.

**Experiment 5:**  $h_{dS} = 5$  secunde,  $R_L \sim 25 \Omega$

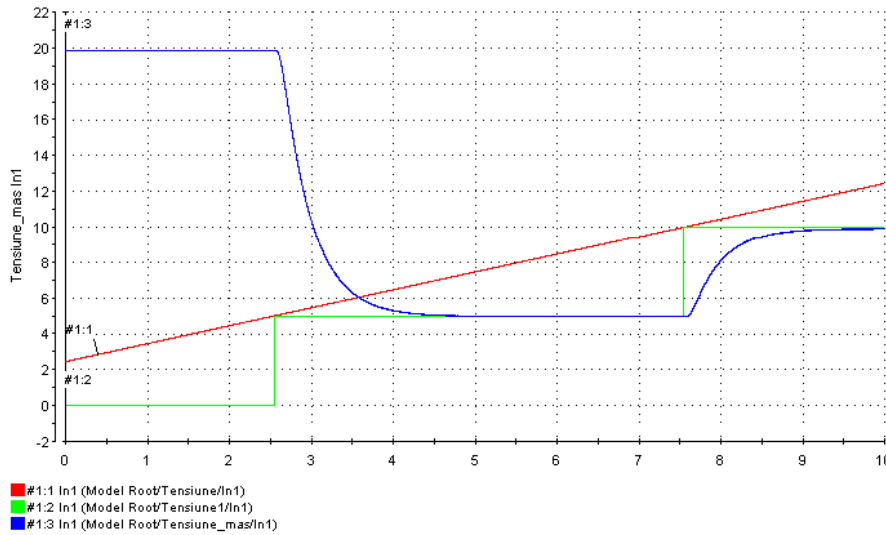


Fig. A3.2-1. Înregistrări ale semnalelor  $U$ ,  $V_S^*$ ,  $V_S$  în cazul discretizării semnalului cu pasul de 5 secunde ( $h_{dS} = 5$  secunde)

**Experiment 6:**  $h_{dS} = 5$  secunde,  $R_L \sim 15 \Omega$

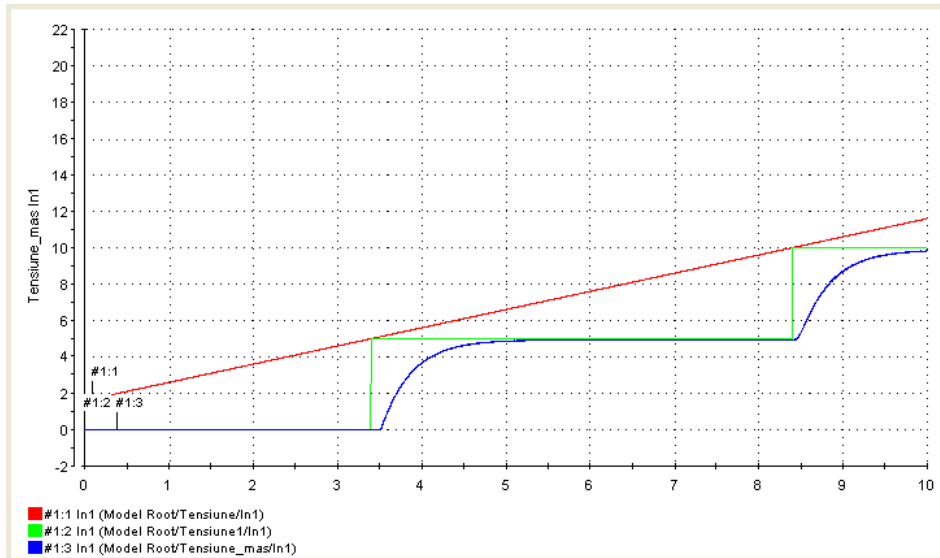


Fig. A3.2-2. Înregistrări ale semnalelor  $U$ ,  $V_S^*$ ,  $V_S$  în cazul discretizării semnalului cu pasul de 5 secunde ( $h_{dS} = 5$  secunde)

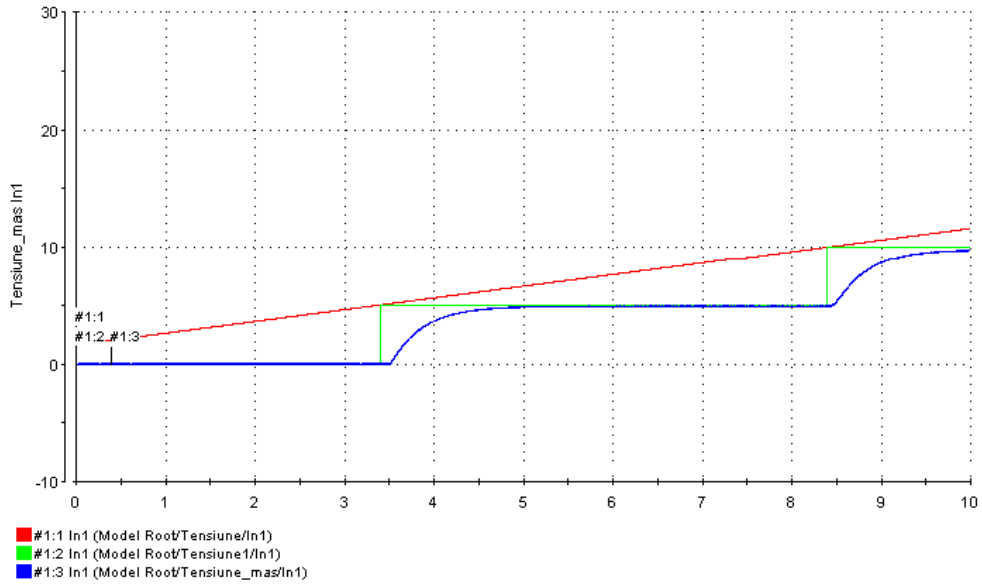
**Experiment 7:**  $h_{dS} = 5$  secunde,  $R_L \sim 8 \Omega$ 

Fig. A3.2-3. Înregistrări ale semnalelor  $U$ ,  $V_S^*$ ,  $V_S$  în cazul discretizării semnalului cu pasul de 5 secunde ( $h_{dS} = 5$  secunde)

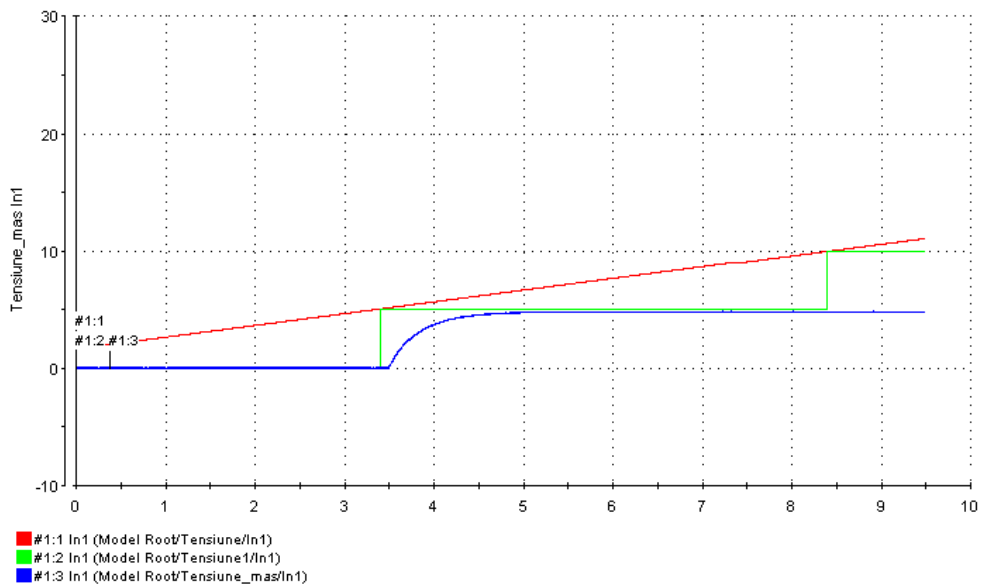
**Experiment 7:**  $h_{dS} = 5$  secunde,  $R_L \sim 4 \Omega$ 

Fig. A3.2-4. Înregistrări ale semnalelor  $U$ ,  $V_S^*$ ,  $V_S$  în cazul discretizării semnalului cu pasul de 5 secunde ( $h_{dS} = 5$  secunde)

**Experiment 8:**  $h_{dS} = 5$  secunde,  $R_L \sim 25 \Omega$ , două surse conectate în serie comandate cu același semnal.

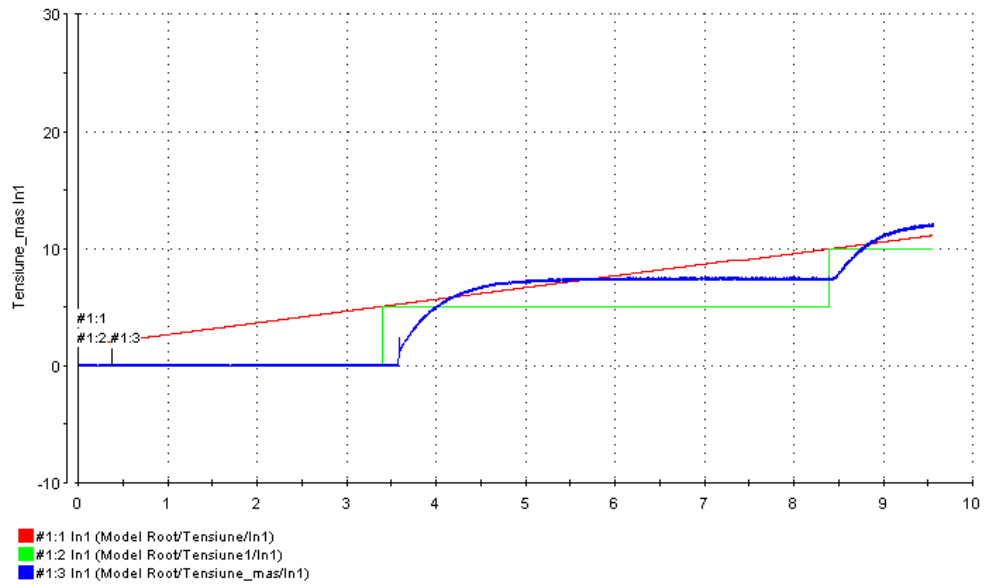
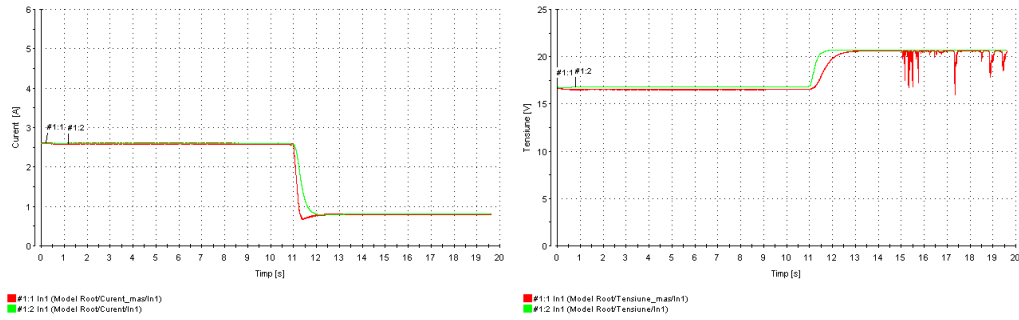


Fig. A3.2-5. Înregistrări ale semnalelor  $U$ ,  $V_S^*$ ,  $V_S$  în cazul discretizării semnalului cu pasul de 5 secunde ( $h_{dS} = 5$  secunde)

### Anexa 3.3 Experimente cu o sursă programabilă - completare la paragraful 3.4.

#### Experimentul C13:

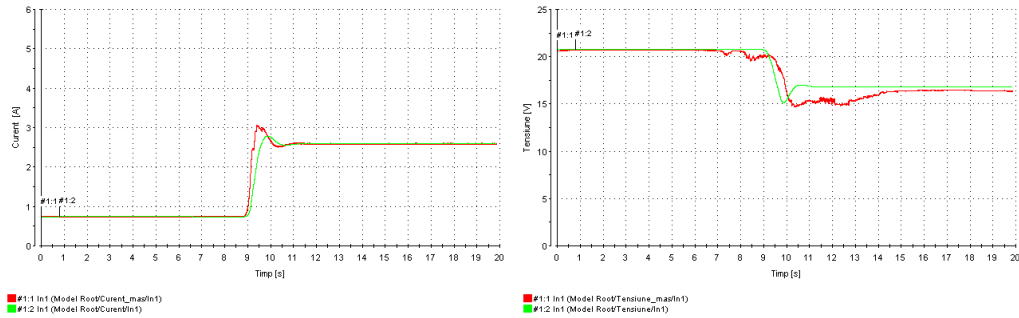


-a-

-b-

Fig. A3.3-1. Experimentul C13.  $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $G = 600\text{ W/m}^2$ , incrementare  $R_L \in [10, 20]\ \Omega$ ,  $T_R = 0.25$  secunde

#### Experimentul C14:

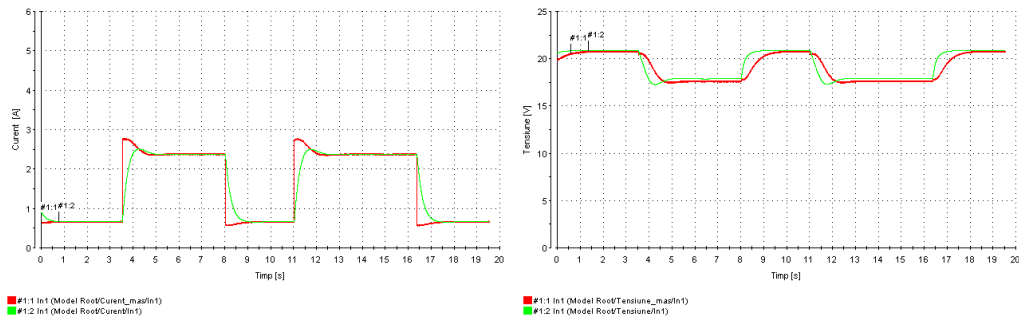


-a-

-b-

Fig. A3.3-2. Experimentul C14.  $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $G = 600\text{ W/m}^2$ , decrementare  $R_L \in [20, 10]\ \Omega$ ,  $T_R = 0.25$  secunde

#### Experimentul C15:



-a-

-b-

Fig. A3.3-3. Experimentul C15.  $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $G = 600\text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare  $R_L \in \{10, 35\}\ \Omega$ ,  $T_R = 0.25$  secunde

**Experimentul C16:**

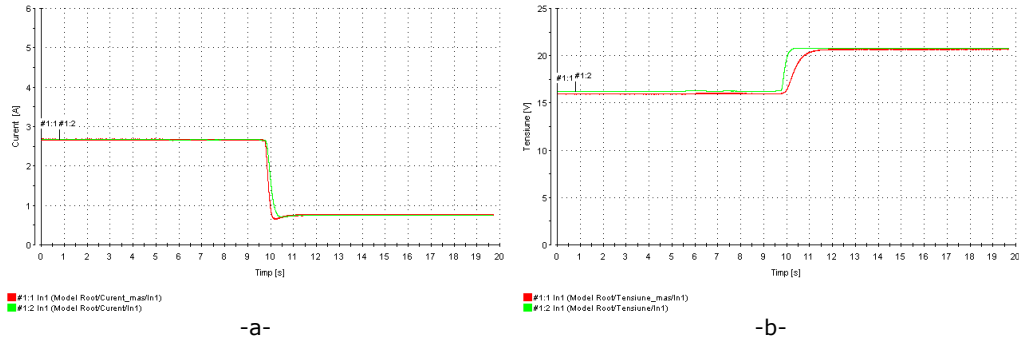


Fig. A3.3-4. Experimentul C16.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , incrementare  $R_L \in [10, 20] \Omega$ ,  $T_R = 0.125$  secunde

**Experimentul C17:**

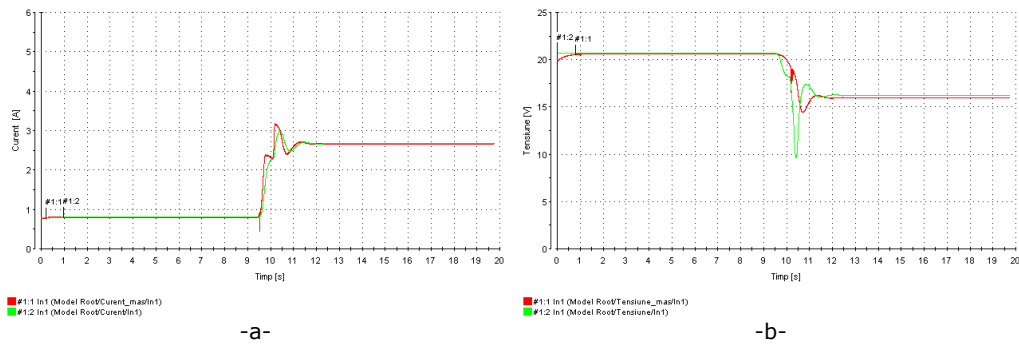


Fig. A3.3-5. Experimentul C17.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , decrementare  $R_L \in [20, 10] \Omega$ ,  $T_R = 0.125$  secunde

**Experimentul C18:**

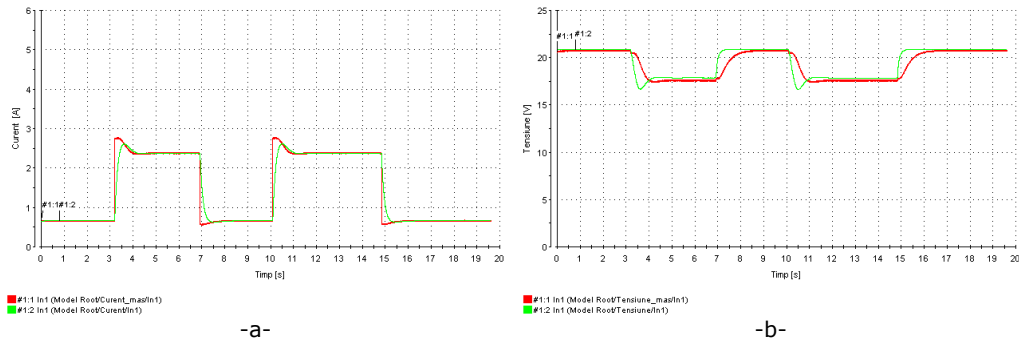


Fig. A3.3-6. Experimentul C18.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare  $R_L \in \{10, 35\} \Omega$ ,  $T_R = 0.125$  secunde

**Experimentul C19:**

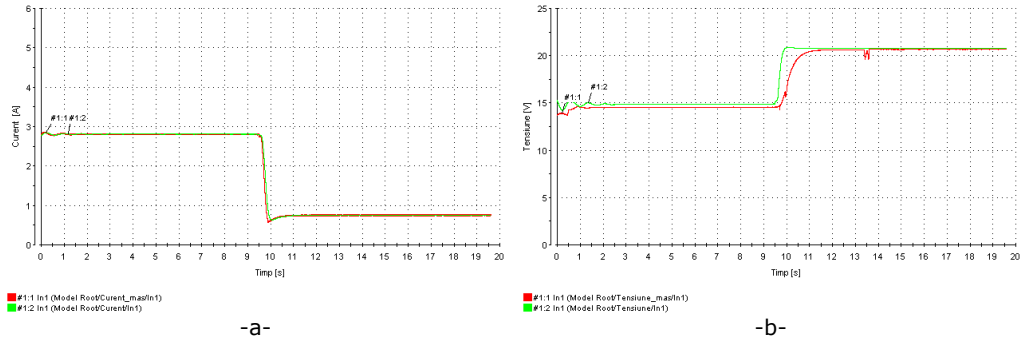


Fig. A3.3-7. Experimentul C19.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , incrementare  $R_L \in [10, 20] \Omega$ ,  $T_R = 0.0625$  secunde

**Experimentul C20:**

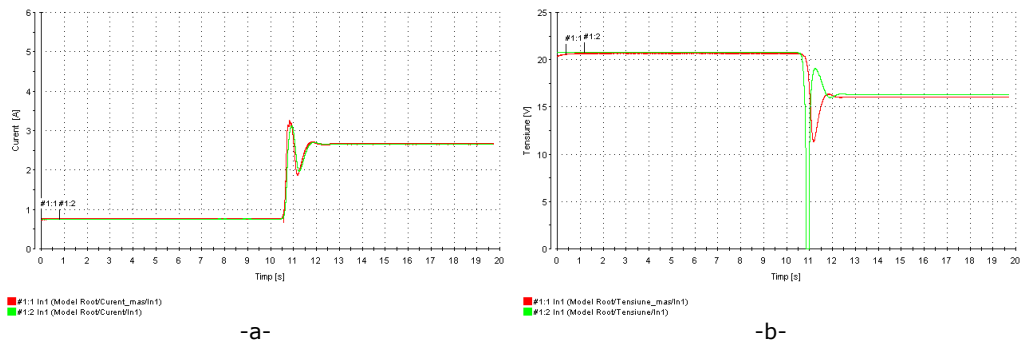


Fig. A3.3-8. Experimentul C20.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , decrementare  $R_L \in [20, 10] \Omega$ ,  $T_R = 0.0625$  secunde

**Experimentul C21:**

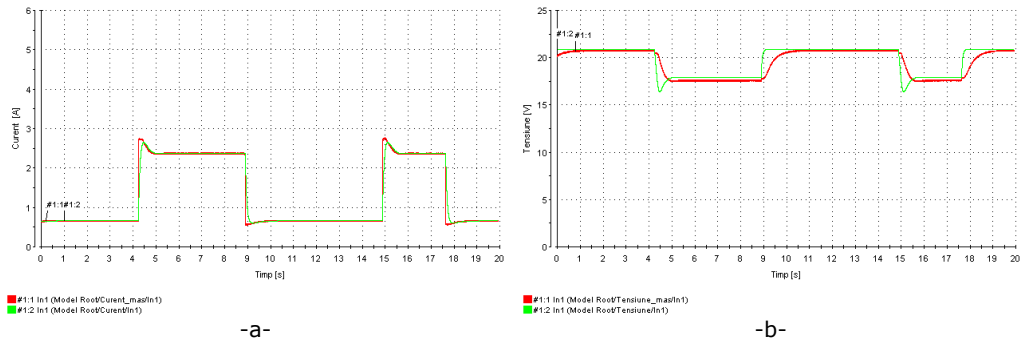


Fig. A3.3-9. Experimentul C21.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare  $R_L \in \{10, 35\} \Omega$ ,  $T_R = 0.0625$  secunde



## Anexa 3.4 Experimente cu două surse programabile - completare la paragraful 3.4.

### Experimentul C22:

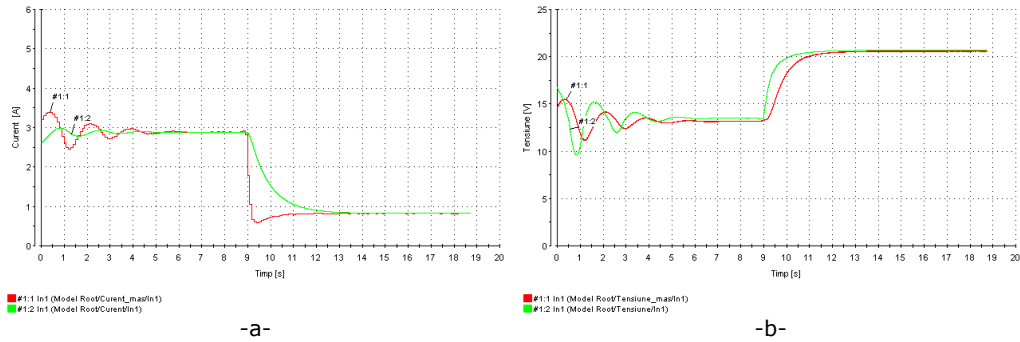


Fig. A3.4-1. Experimentul C22.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , incrementare  $R_L \in [10, 20] \Omega$ ,  $T_R = 0.0625$  secunde

### Experimentul C23:

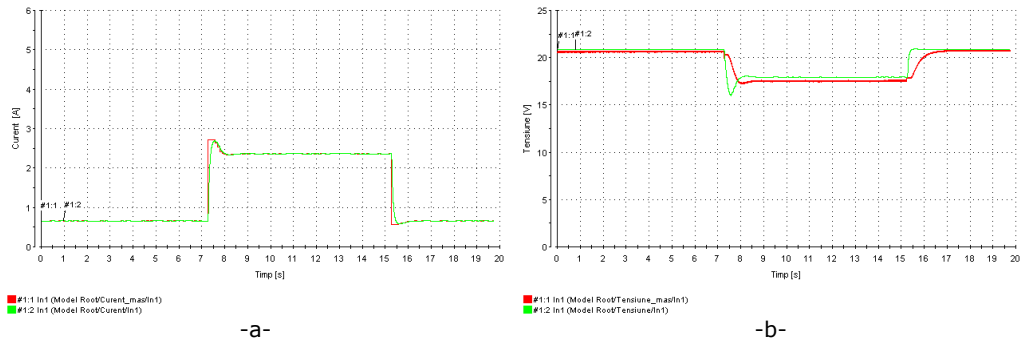


Fig. A3.4-2. Experimentul C23.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare  $R_L \in \{10, 35\} \Omega$ ,  $T_R = 0.0625$  secunde

## Anexa 3.5 Experimente cu o sursă programabilă – cu compensator - completare la paragraful 3.4.

### Experimentul D1:

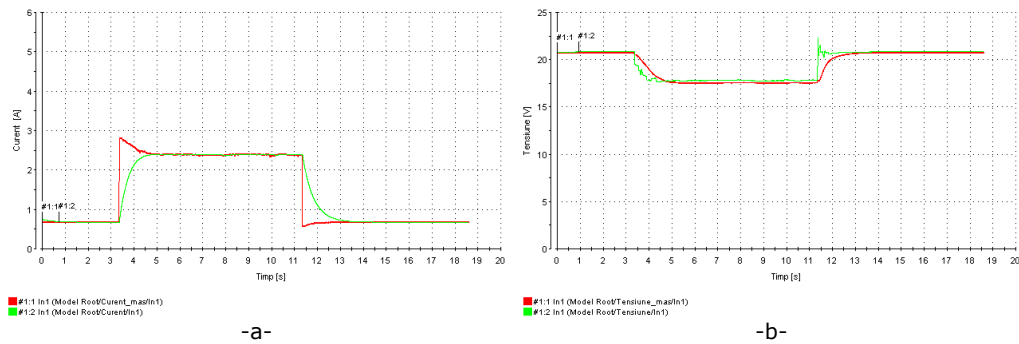


Fig. A3.5-1. Experimentul D1.  $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $G = 600\text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare  $R_L \in \{10, 35\}\ \Omega$ ,  $T_R = 0.5$  secunde,  $T_D = 0.3$  secunde,  $T_1 = 0.01$  secunde

### Experimentul D2:

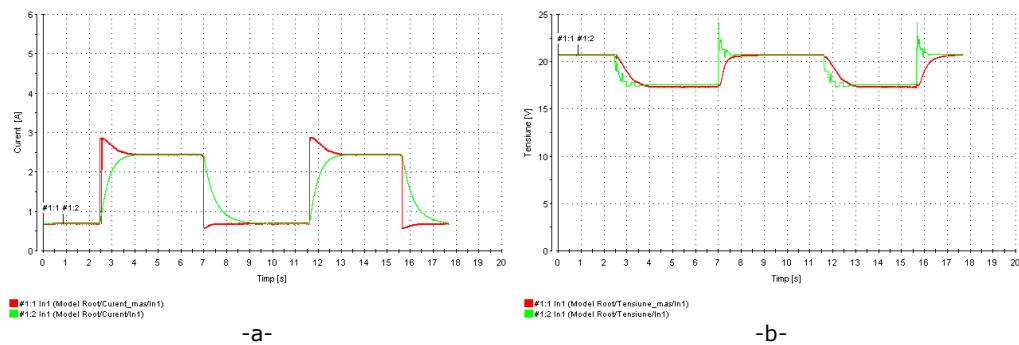


Fig. A3.5-2. Experimentul D2.  $\theta = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $G = 600\text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare  $R_L \in \{10, 35\}\ \Omega$ ,  $T_R = 0.5$  secunde,  $T_D = 0.4$  secunde,  $T_1 = 0.01$  secunde

**Experimentul D3:**

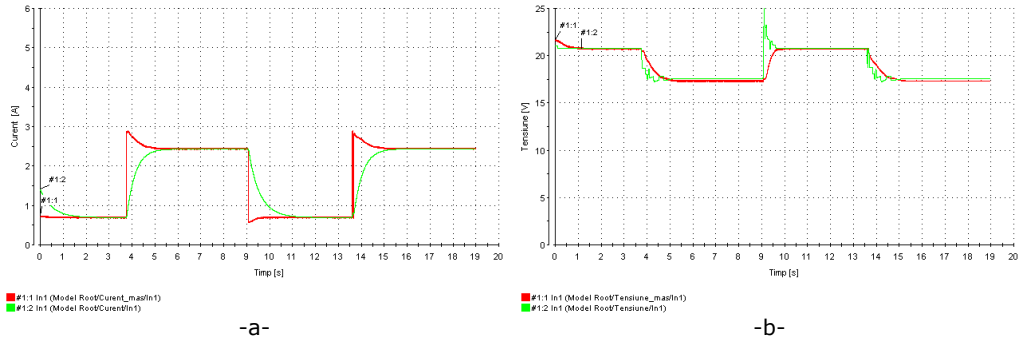


Fig. A3.5-3. Experimentul D3.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare  $R_L \in \{10, 35\} \Omega$ ,  $T_R = 0.5 \text{ secunde}$ ,  $T_D = 0.5 \text{ secunde}$ ,  $T_1 = 0.01 \text{ secunde}$

**Experimentul D4:**

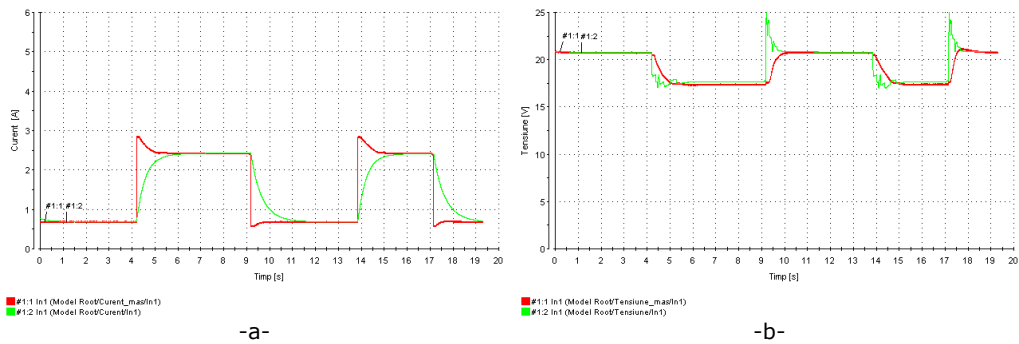


Fig. A3.5-4. Experimentul D4.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare  $R_L \in \{10, 35\} \Omega$ ,  $T_R = 0.5 \text{ secunde}$ ,  $T_D = 0.6 \text{ secunde}$ ,  $T_1 = 0.01 \text{ secunde}$

**Experimentul D5:**

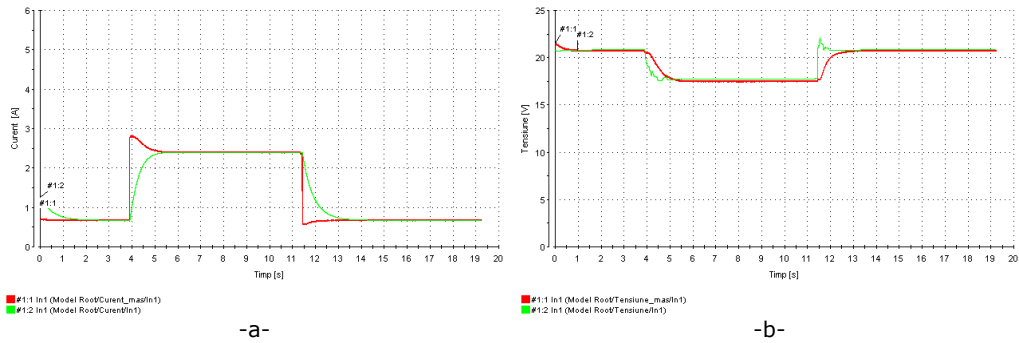


Fig. A3.5-5. Experimentul D5.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare  $R_L \in \{10, 35\} \Omega$ ,  $T_R = 0.5 \text{ secunde}$ ,  $T_D = 0.4 \text{ secunde}$ ,  $T_1 = 0.04 \text{ secunde}$

**Experimentul D6:**

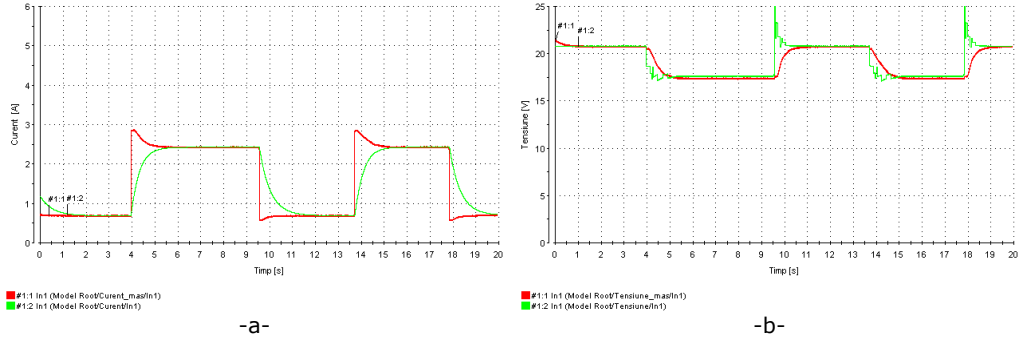


Fig. A3.5-6. Experimentul D6.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare  $R_L \in \{10, 35\} \Omega$ ,  $T_R = 0.5 \text{ secunde}$ ,  $T_D = 0.5 \text{ secunde}$ ,  $T_1 = 0.001 \text{ secunde}$

**Experimentul D7:**

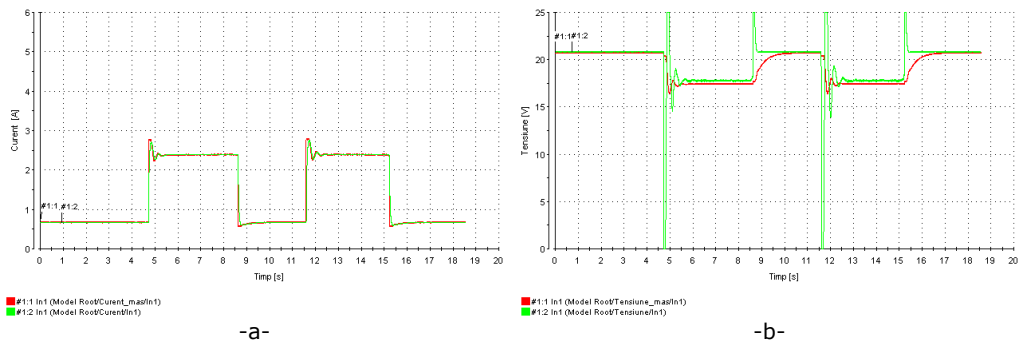


Fig. A3.5-7. Experimentul D6.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare  $R_L \in \{10, 35\} \Omega$ ,  $T_R = 0.03125 \text{ secunde}$ ,  $T_D = 0.5 \text{ secunde}$ ,  $T_1 = 0.01 \text{ secunde}$

**Experimentul D8:**

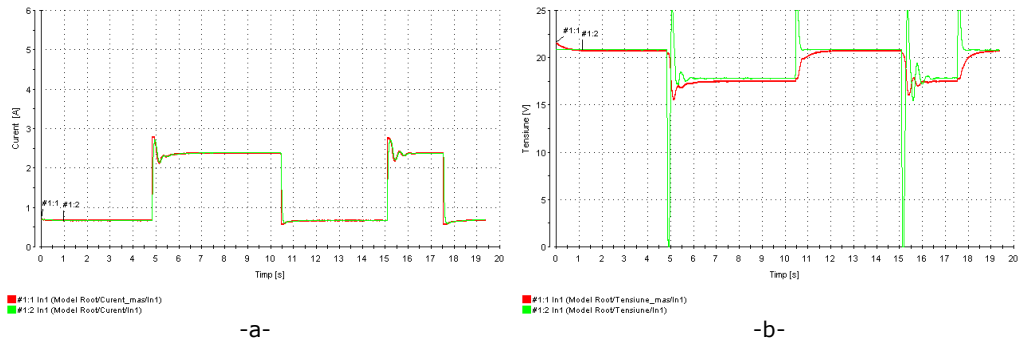


Fig. A3.5-8. Experimentul D8.  $\theta = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$ , scurtcircuitare  $R_L \in \{10, 35\} \Omega$ ,  $T_R = 0.5 \text{ secunde}$ ,  $T_D = 0.5 \text{ secunde}$ ,  $T_1 = 0.04 \text{ secunde}$

## Anexa 4.1 Estimarea intensității radiației solare și a temperaturii în funcție de poziția panoului

### Estimarea intensității radiației solare:

Conform lucrărilor [Nooriana 2008] și [Soga 1999], intensitatea radiației solare globale care ajunge pe o suprafață înclinată poate fi estimată folosind formula:

$$\hat{G}_{PV\_P} = \hat{G}_{dir} + \hat{G}_{diff} + \hat{G}_{gr} \quad (A4.1-1)$$

în care  $\hat{G}_{PV\_P}$ ,  $\hat{G}_{dir}$ ,  $\hat{G}_{diff}$ ,  $\hat{G}_{gr}$ , sunt estimări ale:

- intensității radiației solare globale de pe panoul fotovoltaic ( $G_{PV\_P}$ ),
- intensității radiației directe ( $G_{dir}$ ),
- intensității radiației difuze ( $G_{diff}$ ),
- intensității radiației reflectate de sol - ground reflected ( $G_{gr}$ ).

În continuare se prezintă modul de calcul a componentelor intensității radiației globale estimate ( $\hat{G}_{PV\_P}$ ).

- În acord cu [Soga 1999] avem:

$$\hat{G}_{dir} = G_{h-dir} \cdot \cos \xi \quad (A4.1-2)$$

unde  $G_{h-dir}$  este intensitatea radiației directe normale (normal direct radiation) - intensitate măsurabilă iar  $\xi$  este unghiul de incidență pentru o suprafață înclinată. Valoarea lui  $\cos \xi$  depinde de unghiul azimut al PV\_P ( $\varphi_{PV\_P}$ ), elevația PV\_P ( $\beta_{PV\_P}$ ), unghiul azimut al Soarelui ( $\varphi_S$ ) și unghiul zenit al Soarelui ( $Z_S$ ) potrivit relației [Nooriana 2008]:

$$\cos \xi = \sin \beta_{PV\_P} \cdot \sin Z_S \cdot \cos |\varphi_{PV\_P} - \varphi_S| + \cos \beta_{PV\_P} \cdot \cos Z_S \quad (A4.1-3)$$

- Potrivit lucrărilor [Robinson 2003] și [Soga 1999] intensitatea radiației reflectate de sol se calculează cu formula:

$$\hat{G}_{gr} = (G_{h-diff} + G_{h-dir} \cdot \sin \beta_S) \cdot gr \cdot \left( \frac{1 + \cos \beta_{PV\_P}}{2} \right) \quad (A4.1-4)$$

unde  $G_{h-diff}$  este intensitatea radiației orizontale difuze (diffuse horizontal radiation) - intensitate măsurabilă,  $\beta_S$  elevația Soarelui, iar  $gr$  este coeficientul de reflexie al solului (ground reflectance - albedo).

- Pentru estimarea intensității radiației difuze s-a folosit modelul (A4.1-5) al lui Perez [Perez 1990] considerat în [Chirattananona 2007], [Nooriana 2008], [Soga 1999] ca cel mai performant model (este o îmbunătățire a modelului prezentat în [Perez 1987]):

$$\hat{G}_{diff} = G_{h-diff} \cdot \left( \left( \frac{1 + \cos \beta_{PV\_P}}{2} \right) \cdot (1 - F_a) + F_a \cdot \frac{a}{c} + F_b \cdot \sin \beta_{PV\_P} \right) \quad (A4.1-5)$$

unde

- $\frac{a}{c} = \frac{\max[0, \cos \xi]}{\max[0,086, \cos Z_S]}$

$Z_S$  este unghiul de zenit al Soarelui calculat cu formula:  $Z_S = \frac{\pi}{2} - \beta_S$ .

$$F_a = F_{11}(\varepsilon) + F_{12}(\varepsilon) \cdot \Delta + F_{13}(\varepsilon) \cdot Z_S \quad (A4.1-6a)$$

$$F_b = F_{21}(\varepsilon) + F_{22}(\varepsilon) \cdot \Delta + F_{23}(\varepsilon) \cdot Z_S \quad (A4.1-6b)$$

În cele două funcții argumentele sunt ([Yang 2007a], [Soga 1999], [Perez 1990])

$$\varepsilon = \frac{\frac{G_{h\_diff} + G_{h\_dir}}{G_{h\_diff}} + 1.041 \cdot Z_S^3}{1 + 1.041 \cdot Z_S^3} \quad (A4.1-7)$$

$$\Delta = \frac{m \cdot G_{h\_diff}}{G_{er}} \quad (A4.1-8)$$

În a doua relație parametrul  $m$  se obține cu una din formulele

$$m = \frac{1}{\cos Z_S} \quad [\text{Chirattananona 2007}] \quad (A4.1-9a)$$

$$m = \frac{1}{\cos Z_S + 0.15 \cdot (\beta_S + 3.885)^{-1.235}} \quad [\text{Wang 2006}] \quad (A4.1-9b)$$

sau (atunci când  $Z_S > 70^\circ$ )

$$m = \frac{1}{\cos Z_S + 0.50572 \cdot (96.07995 - Z_S)^{-1.6364}} \quad [\text{Kasten 1989}] \quad (A4.1-9c)$$

Unghiurile din (A4.1-9b) și (A4.1-9c) sunt considerate în grade iar diferențele dintre valorile obținute cu cele două formule sunt foarte mici. Unghiul  $Z_S$  se introduce în radiani.

Pentru parametrul  $G_{er}$  se folosesc aproximările:

$$G_{er} = 1367 \text{ W/m}^2 \quad [\text{Chirattananona 2007}], [\text{Soga 1999}] \quad (A4.1-10a)$$

$$G_{er} = 1367 \cdot \left( 1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot doy}{365}\right) \right) \quad [\text{Robinson 2003}] \quad (A4.1-10b)$$

(unde  $doy$  este ziua curentă din an (current *day of the year*)),  
sau, după [Partridge 1976]:

$$G_{er} = 1367 \cdot \left( 1 + 0.034221 \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot doy}{365}\right) + 0.001280 \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot doy}{365}\right) + 0.000719 \cdot \cos\left(\frac{4\pi \cdot doy}{365}\right) + 0.000077 \cdot \sin\left(\frac{4\pi \cdot doy}{365}\right) \right) \quad (A4.1-10c)$$

Coeficientul de claritate a cerului (the sky clearness),  $\varepsilon$ , ia valori de la  $\varepsilon=1$  pentru cer acoperit și  $\varepsilon=6.2$  pentru cer senin. În funcție de acesta, funcțiile din formulele (A4.1-6) iau valorile [Perez 1990].

### **Estimarea temperaturii:**

Pentru estimarea temperaturii la nivelul panoului în funcție de poziția acestuia s-a folosit, după lucrările [Makvart 2010] și [van der Borg 2003], formula:

$$\hat{\theta}_{PV\_P} = \theta_{air} + k_{PV\_P} \cdot \hat{G}_{PV\_P} \quad (A4.1-11)$$

în care:

$\theta_{air}$  este temperatura aerului

$$k_{PV\_P} = \frac{NOTC - T_{NOTC}}{G_{NOTC}} \quad (A4.1-12)$$

$T_{NOTC}$  este temperatura ambientală iar  $G_{NOTC}$  este radiație globală date în specificațiile panoului fotovoltaic ( $NOTC$  - *Normal Operating Cell Temperature*, în domeniul  $43^{\circ}$ - $46^{\circ}$  C).

**Tabelul A4.1-1:** Valorile utilizate de în [Perez 1990] pentru calcularea  $F_a$  și  $F_b$

$\epsilon$	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{13}$	$F_{21}$	$F_{22}$	$F_{23}$
1-1.065	-0.008	0.588	-0.062	-0.060	0.072	-0.022
1.065-1.23	0.130	0.683	-0.151	-0.019	0.066	-0.029
1.23-1.5	0.330	0.487	-0.221	0.055	-0.064	-0.026
1.5-1.95	0.568	0.187	-0.295	0.109	-0.152	-0.014
1.95-2.8	0.873	-0.392	-0.362	0.226	-0.462	0.001
2.8-4.5	1.132	-1.237	-0.412	0.288	-0.823	0.056
4.5-6.2	1.060	-1.600	-0.359	0.264	-1.127	0.131
6.2-	0.678	-0.327	-0.250	0.156	-1.377	0.251

Maniera în care se folosesc aceste relații este ilustrată în lucrarea în curs de publicare [Dragomir 2012] la care autorul prezentei teze este coautor.

## Anexa 4.2 Aplicarea metodei de interpolare Tsuno

Pentru aplicarea metodei de interpolare Tsuno [Tsuno 2009] detaliată în subcapitolul 2.4, respectiv prin organigrama din Fig. 2.4-2 a fost creată aplicația prezentată în continuare. Interpolarea se realizează în 3 etape (3 interpolări succesive):

- pașii 1-7 sunt considerați etapa 1 - realizează interpolarea caracteristicilor (1) cu (2) și se obține caracteristica (5);
- pașii 8-14 sunt considerați etapa 2 - realizează interpolarea caracteristicilor (3) cu (4) și se obține caracteristica (6);
- pașii 15-21 sunt considerați etapa 3 - realizează interpolarea caracteristicilor (5) cu (6) și se obține caracteristica (7).

Cele 4 caracteristici cunoscute au parametrii:

- caracteristica 1:  $\theta_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G_1 = 1000 \text{ W/m}^2$ ,
- caracteristica 2:  $\theta_2 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G_1 = 1000 \text{ W/m}^2$ ,
- caracteristica 3:  $\theta_3 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G_3 = 600 \text{ W/m}^2$ ,
- caracteristica 3:  $\theta_4 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $G_3 = 600 \text{ W/m}^2$ .

În continuare se prezintă codul sursă și modelele Simulink utilizate în cursul celor 3 etape (Fig. A4.2-1, Fig.A4.2-2, Fig. A4.2-3):

### Cod sursă

```
%caracteristica 1
teta1=10
g1=1000
isc1=5.02

%caracteristica 2
teta2=60
g1=1000
isc2=4.99

%caracteristica 3
teta3=10
g3=600
isc3=3

%caracteristica 4
teta4=25
g3=600
isc4=2.97

%valori dorite
tetax=40
gx=800

%2
a1=(tetax-teta1)/(teta2-teta1)

%9
a2=(tetax-teta3)/(teta4-teta3)

%16
a3=(gx-g1)/(g3-g1)
```



```
%Etapa 1
sim('interpolare1cu2')
plot(v1,i1)
hold on
xlabel('Tensiune [V]')
ylabel('Curent [A]')
plot(v2,i2)
plot(v5,i5,'r')
xlim([0,25])
ylim([0,6])
hold off
grid

%Etapa 2
sim('interpolare3cu4')
figure
plot(v3,i3)
hold on
xlabel('Tensiune [V]')
ylabel('Curent [A]')
plot(v4,i4)
plot(v6,i6,'r')
xlim([0,25])
ylim([0,6])
hold off
grid

%Inversare vector current/tensiune
ii5=i5(52);
ii6=i6(52);
vv5=v5(52);
vv6=v6(52);
for ii=1:51
    ii5=[ii5;i5(52-ii)];
    vv5=[vv5;v5(52-ii)];
    ii6=[ii6;i6(52-ii)];
    vv6=[vv6;v6(52-ii)];
end

%Etapa 3
sim('interpolare5cu6')
figure
plot(v5,i5)
hold on
xlabel('Tensiune [V]')
ylabel('Curent [A]')
plot(v6,i6)
plot(v7,i7,'r')
xlim([0,25])
ylim([0,6])
hold off
grid
p=i7(1)*v7(1);
Pmax=0;
Imax=0;
Vmax=0;
for jj=2:52
    p=[p,i7(jj)*v7(jj)];
    if Pmax<p(jj)
        Pmax=p(jj);
        Imax=i7(jj);
    end
end
```

```

Vmax=v7(jj);
end
end

%Afişare rezultate obţinute pentru o anumita pereche (tetax, gx)
tetax
gx
Pmax
Imax
Vmax
    
```

**Modele Simulink**

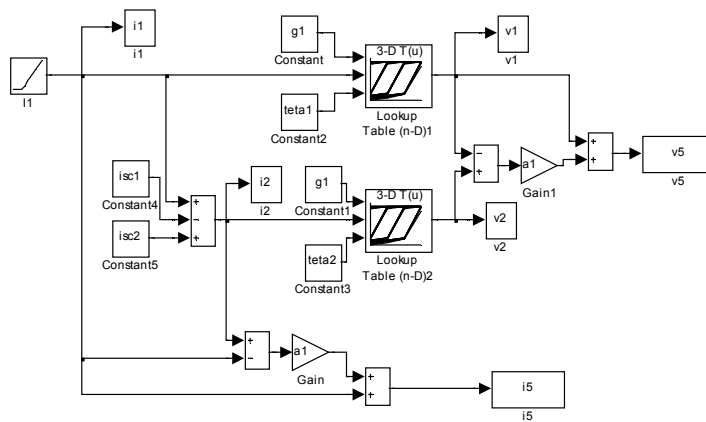


Fig. A4.2-1. Modelul Simulink utilizat în etapa 1 – interpolarea între caracteristicile (1) cu (2) și conduce la caracteristică (5)

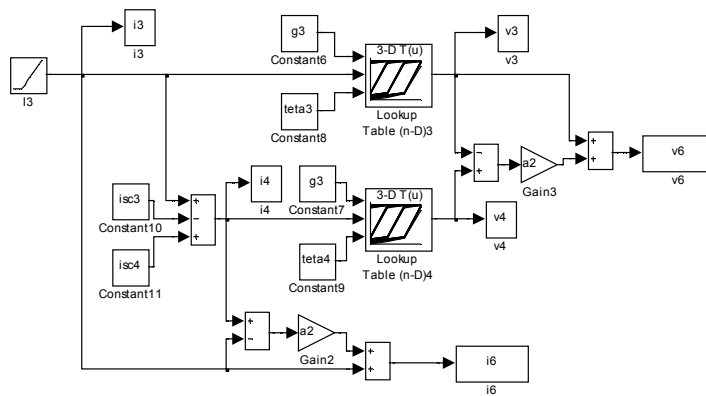


Fig. A4.2-2. Modelul Simulink utilizat în etapa 2 – interpolarea între caracteristicile (3) cu (4) și conduce la caracteristică (6)

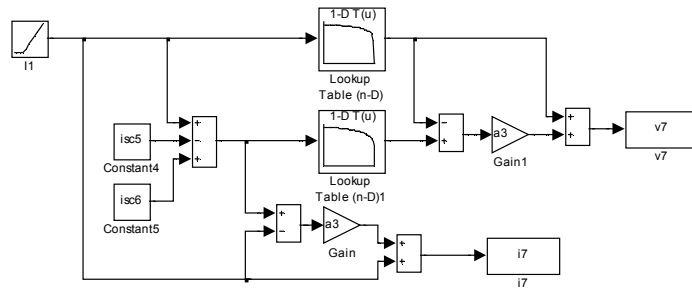


Fig. A4.2-3. Modelul Simulink utilizat în etapa 3 – interpolarea între caracteristicile (5) cu (6) și conduce la caracteristică (7)

### Anexa 4.3 Caracteristici de comandă aferente Scenariului 2 (schema din Fig. 4.4-4 și panou cu caracteristicile externe din Fig. 4.4-9)

Tabel A.4.3-1:  $G=400 \text{ W/m}^2$ ,  $\theta=25^\circ \text{C}$ 

$G$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\theta$ [°C]	$u$	$V_{pv\_p\_med}$ [V]	$V_{out\_med}$ [V]	$I_{pv\_p\_med}$ [A]	$I_{out\_med}$ [A]	$P_{pv\_p\_med}$ [W]	$P_{out\_med}$ [W]	$V_{c1\_med}$ [V]	$I_{d\_med}$ [A]
400	25	0,05	21,7292089	1,086462659	0,034595851	0,54323133	0,751740113	0,590206997	1,071606521	0,691792711
400	25	0,10	21,43374659	2,143390324	0,1365008	1,071695162	2,925718637	2,297083532	2,114081905	1,364779346
400	25	0,20	20,31136464	4,062367277	0,517412617	2,031183639	10,50930195	8,251477883	4,00681904	2,586666018
400	25	0,30	18,55974923	5,568154957	1,063791596	2,784077478	19,74355567	15,50226691	5,492016792	3,545459126
400	25	0,40	15,97994439	6,392364432	1,628324311	3,196182216	26,02044387	20,43125078	6,304956144	4,07026509
400	25	0,50	12,15634809	6,078577045	1,935460883	3,039288523	23,52806524	18,47460552	5,995459443	3,870464549
400	25	0,60	8,639539618	5,18405456	1,980720921	2,59202728	17,11251568	13,43723694	5,113168531	3,300887571
400	25	0,70	6,362289475	4,453820236	1,985275421	2,226910118	12,63089625	9,918268171	4,392919327	2,835919209
400	25	0,80	4,878656089	3,903035585	1,988242688	1,951517793	9,699951996	7,616847079	3,849666026	2,485213381
400	25	0,90	3,858867151	3,473011621	1,990282266	1,736505811	7,680234782	6,030905591	3,425522148	2,211400544
400	25	0,95	3,464781472	3,291550639	1,991070437	1,645775319	6,898623941	5,417152968	3,246542437	2,095857342

Tabel A.4.3-2:  $G=600 \text{ W/m}^2$ ,  $\theta=25^\circ \text{C}$ 

$G$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\theta$ [°C]	$u$	$V_{pv\_p\_med}$ [V]	$V_{out\_med}$ [V]	$I_{pv\_p\_med}$ [A]	$I_{out\_med}$ [A]	$P_{pv\_p\_med}$ [W]	$P_{out\_med}$ [W]	$V_{c1\_med}$ [V]	$I_{d\_med}$ [A]
600	25	0,05	21,26557206	1,063280164	0,033857706	0,531640082	0,720002729	0,565288523	1,04874102	0,677031522
600	25	0,10	21,13394573	2,113405696	0,134591332	1,056702848	2,844435288	2,233263685	2,084507283	1,345686976
600	25	0,20	20,61466782	4,123003227	0,525135804	2,061501613	10,82537551	8,499643661	4,066625861	2,625275267
600	25	0,30	19,78177422	5,934714987	1,133822789	2,967357494	22,42861948	17,61052561	5,853564532	3,778862042
600	25	0,40	18,60232967	7,44126012	1,895509523	3,72063006	35,26019512	27,68629705	7,339509381	4,738137448
600	25	0,50	16,30120816	8,151143814	2,595380447	4,075571907	42,30770581	33,22067357	8,039686227	5,190147782
600	25	0,60	12,63806285	7,5833005	2,897423621	3,79165025	36,61771723	28,75327908	7,479607522	4,828580039
600	25	0,70	9,5529872	6,687417772	2,980894026	3,343708886	28,47644096	22,36080263	6,595974965	4,25813695
600	25	0,80	7,325309443	5,860413791	2,985349381	2,930206896	21,86860734	17,17223322	5,780279319	3,731551623
600	25	0,90	5,794094822	5,214732164	2,98841181	2,607366082	17,31514123	13,59671742	5,143426649	3,320421237
600	25	0,95	5,202374583	4,942268227	2,989595251	2,471134113	15,5529943	12,21300798	4,874688343	3,146932946

Tabel A.4.3-3:  $G=800 \text{ W/m}^2$ ,  $\theta=25^\circ \text{C}$ 

$G$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\theta$ [°C]	$u$	$V_{pv\_p\_med}$ [V]	$V_{out\_med}$ [V]	$I_{pv\_p\_med}$ [A]	$I_{out\_med}$ [A]	$P_{pv\_p\_med}$ [W]	$P_{out\_med}$ [W]	$V_{c1\_med}$ [V]	$I_{d\_med}$ [A]
800	25	0,05	21,47021876	1,073511909	0,034183559	0,536755955	0,73392731	0,576220199	1,058832858	0,683546469
800	25	0,10	21,38388111	2,138395038	0,136182856	1,069197519	2,91210123	2,286389057	2,109154925	1,361598655
800	25	0,20	21,04536655	4,20911635	0,536103962	2,104558175	11,28229913	8,858398859	4,151561485	2,680106816
800	25	0,30	20,48439995	6,145436008	1,174081096	3,072718004	24,04962367	18,88330405	6,061404184	3,913036247
800	25	0,40	19,71301044	7,885436357	2,008654608	3,942718179	39,59526403	31,0901891	7,777612015	5,020961597
800	25	0,50	18,65138004	9,326083889	2,969489856	4,663041945	55,38358183	43,48805235	9,198560337	5,938277464
800	25	0,60	15,84755203	9,509108998	3,633235562	4,754554499	57,57770975	45,21166477	9,379082786	6,054816619
800	25	0,70	12,58575524	8,810438563	3,927223453	4,405219281	49,42695493	38,81195619	8,68996587	5,609946211
800	25	0,80	9,840332352	7,872489193	4,010319335	3,936244597	39,46287388	30,98805806	7,764841885	5,01271768
800	25	0,90	7,78340071	7,005123541	4,014433199	3,50256177	31,2459419	24,53588088	6,909336465	4,460432529
800	25	0,95	6,98852319	6,639113651	4,016022954	3,319556826	28,06606946	22,0389157	6,548331341	4,227379924

**Tabel A.4.3-4:**  $G=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $\theta=25 \text{ }^\circ\text{C}$ 

$G$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\theta$ [°C]	$U$	$V_{pv\_p\_med}$ [V]	$V_{out\_med}$ [V]	$I_{pv\_p\_med}$ [A]	$I_{out\_med}$ [A]	$P_{pv\_p\_med}$ [W]	$P_{out\_med}$ [W]	$V_{c1\_med}$ [V]	$I_{d\_med}$ [A]
1000	25	0.05	21.9761	1.0988	0.0350	0.5494	0.7689	0.6037	1.0838	0.6997
1000	25	0.10	21.9047	2.1905	0.1395	1.0952	3.0557	2.3991	2.1605	1.3948
1000	25	0.20	21.6237	4.3248	0.5508	2.1624	11.9109	9.3519	4.2656	2.7538
1000	25	0.30	21.1712	6.3514	1.2134	3.1757	25.6888	20.1703	6.2646	4.0442
1000	25	0.40	20.5350	8.2141	2.0924	4.1071	42.9652	33.7362	8.1018	5.2303
1000	25	0.50	19.7131	9.8568	3.1385	4.9284	61.8664	48.5784	9.7220	6.2762
1000	25	0.60	18.3785	11.0276	4.2134	5.5138	77.4354	60.8045	10.8768	7.0217
1000	25	0.70	15.0095	10.5072	4.6835	5.2536	70.2974	55.2003	10.3635	6.6903
1000	25	0.80	12.1954	9.7566	4.9701	4.8783	60.6125	47.5957	9.6232	6.2124
1000	25	0.90	9.7341	8.7608	5.0205	4.3804	48.8703	38.3754	8.6410	5.5783
1000	25	0.95	8.7400	8.3030	5.0225	4.1515	43.8968	34.4700	8.1895	5.2868

### Anexa 4.4 Caracteristici de comandă aferente Scenariului 4 (schema din Fig. 4.4-16 și panou cu caracteristicile externe din Fig. 4.4-9)

Tabel A.4.4-1:  $G=400 \text{ W/m}^2$ ,  $\theta=25 \text{ }^\circ\text{C}$

$G$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\theta$ [°C]	$u$	$V_{pv\_p\_med}$ [V]	$V_{out\_med}$ [V]	$I_{pv\_p\_med}$ [A]	$I_{out\_med}$ [A]	$P_{pv\_p\_med}$ [W]	$P_{out\_med}$ [W]	$V_{c1\_med}$ [V]	$I_{d\_med}$ [A]
400	25	0.05	19,26635218	20,2803198	0,85390607	0,81121279	16,4516551	16,4516549	20,2760504	0,85390607
400	25	0.10	18,99951372	21,1103807	0,93823074	0,84441522	17,8259275	17,8259272	21,1009991	0,93823073
400	25	0.20	18,28351971	22,8537492	1,14265512	0,91414996	20,8917562	20,8917554	22,8308986	1,14265510
400	25	0.30	17,24585377	24,6357255	1,40768709	0,98542902	24,2767635	24,2767623	24,5934997	1,40768706
400	25	0.40	15,21352411	25,3542475	1,69017536	1,01416990	25,7135226	25,7135212	25,2866470	1,69017532
400	25	0.50	12,11769063	24,2336922	1,93856121	0,96934769	23,4908839	23,4908826	24,1367709	1,93856115
400	25	0.60	7,906779117	19,8320648	1,98218644	0,79328259	15,6727103	15,7324405	19,7106774	2,00715645
400	25	0.70	4,425193503	14,9346892	1,98914961	0,59738757	8,80237183	8,92180483	14,7850876	2,09340403
400	25	0.80	2,206704531	9,92665457	1,99358659	0,39706618	4,39925629	3,94154264	9,78628513	1,80076055
400	25	0.90	0,72700723	4,97138143	1,99654598	0,19885525	1,45150147	0,98858697	4,74162837	2,49638579
400	25	0.95	-0,47576352	2,527267216	1,99895152	0,10109068	-0,95102824	0,255483532	2,334312526	2,030637588

Tabel A.4.4-2:  $G=600 \text{ W/m}^2$ ,  $\theta=25 \text{ }^\circ\text{C}$

$G$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\theta$ [°C]	$u$	$V_{pv\_p\_med}$ [V]	$V_{out\_med}$ [V]	$I_{pv\_p\_med}$ [A]	$I_{out\_med}$ [A]	$P_{pv\_p\_med}$ [W]	$P_{out\_med}$ [W]	$V_{c1\_med}$ [V]	$I_{d\_med}$ [A]
600	25	0.05	20,12398992	21,1830941	0,891917536	0,847323764	17,9489393	17,9489391	21,17863473	0,891917531
600	25	0.10	19,99585831	22,21742027	0,987432085	0,888696811	19,74455128	19,74455089	22,20754675	0,987432075
600	25	0.20	19,64447218	24,55489137	1,227709927	0,982195655	24,11771007	24,11770922	24,53033994	1,227709905
600	25	0.30	19,1535501	27,3608723	1,563402438	1,094434892	29,94469906	29,94469767	27,31397555	1,563402402
600	25	0.40	18,35144586	30,58378179	2,03878927	1,223351272	37,41471971	37,41471773	30,50223799	2,038789216
600	25	0.50	16,24983958	32,49741421	2,599613219	1,299896568	42,24329577	42,24329344	32,36744255	2,599613147
600	25	0.60	11,8126856	29,5299981	2,952809716	1,181199924	34,88061255	34,8808506	29,35283023	2,952878674
600	25	0.70	6,644434689	22,42445836	2,986711131	0,896978334	19,8450068	20,1142693	22,19983126	3,143249299
600	25	0.80	3,313370167	14,90488675	2,99337326	0,59619547	9,918153044	8,886234529	14,69412183	2,703844678
600	25	0.90	1,091602447	7,464536682	2,997816795	0,298581467	3,27241988	2,228776015	7,119562127	3,748327012
600	25	0.95	-0,7143596	3,79469551	3,00142871	0,15178782	-2,14409959	0,57598934	3,50497376	3,04900538

**Tabel A.4.4-3:**  $G=800 \text{ W/m}^2$ ,  $\theta=25 \text{ }^\circ\text{C}$ 

$G$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\theta$ [°C]	$u$	$V_{pv\_p\_med}$ [V]	$V_{out\_med}$ [V]	$I_{pv\_p\_med}$ [A]	$I_{out\_med}$ [A]	$P_{pv\_p\_med}$ [W]	$P_{out\_med}$ [W]	$V_{c1\_med}$ [V]	$I_{d\_med}$ [A]
800	25	0.05	20,71042102	21,80038845	0,917908818	0,872015538	19,01027774	19,01027754	21,79579912	0,917908813
800	25	0.10	20,62180813	22,91291381	1,01834266	0,916516552	21,00006555	21,00006514	22,9027312	1,01834265
800	25	0.20	20,39566195	25,49385186	1,274656746	1,019754075	25,99746197	25,99746105	25,4683616	1,274656723
800	25	0.30	20,07457139	28,67655245	1,638580791	1,147062098	32,89379272	32,89379119	28,62740058	1,638580753
800	25	0.40	19,54900964	32,57959343	2,171835409	1,303183737	42,45720923	42,45720698	32,49272827	2,171835352
800	25	0.50	18,63512998	37,26766254	2,981207772	1,490706501	55,55517125	55,55516819	37,11861242	2,981207689
800	25	0.60	14,8826138	37,20413762	3,720176497	1,488165505	55,36594746	55,36594453	36,98093653	3,720176398
800	25	0.70	8,946201758	30,11699713	4,012107596	1,204679885	35,89312374	36,28136901	29,81946123	4,180038857
800	25	0.80	4,450960591	20,0222312	4,021098079	0,800889248	17,89774798	16,03560515	19,73910366	3,632164685
800	25	0.90	1,466385954	10,02736094	4,027067228	0,401094438	5,905227115	4,021925376	9,563945124	5,035252619
800	25	0.95	-0,95962313	5,097540981	4,031919246	0,203901639	-3,86912301	1,039398381	4,708348088	4,09583057

**Tabel A.4.4-4:**  $G=1000 \text{ W/m}^2$ ,  $\theta=25 \text{ }^\circ\text{C}$ 

$G$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\theta$ [°C]	$u$	$V_{pv\_p\_med}$ [V]	$V_{out\_med}$ [V]	$I_{pv\_p\_med}$ [A]	$I_{out\_med}$ [A]	$P_{pv\_p\_med}$ [W]	$P_{out\_med}$ [W]	$V_{c1\_med}$ [V]	$I_{d\_med}$ [A]
1000	25	0.05	21,35354323	22,4773575	0,946412712	0,8990943	20,2092643	20,20926409	22,47262566	0,946412707
1000	25	0.10	21,28213733	23,64660631	1,050950946	0,945864252	22,36648044	22,36647999	23,63609764	1,050950935
1000	25	0.20	21,09929546	26,37336872	1,318631442	1,054934749	27,82218596	27,82218497	26,34699905	1,318631419
1000	25	0.30	20,82546095	29,74919921	1,699872066	1,189967969	35,40060094	35,4005993	29,69820881	1,699872027
1000	25	0.40	20,40578581	34,00746215	2,267021055	1,360298486	46,26031334	46,26031088	33,9167899	2,267020994
1000	25	0.50	19,7012721	39,39979817	3,151767616	1,575991927	62,09379113	62,09378771	39,24222061	3,151767529
1000	25	0.60	17,65794733	44,14202446	4,413920962	1,765680978	77,9407797	77,94077559	43,87720047	4,413920845
1000	25	0.70	11,25360432	37,51083968	5,001195935	1,500433587	56,28147985	56,28256548	37,16072393	5,0011951159
1000	25	0.80	5,56646188	25,04020974	5,028867076	1,00160839	27,99299515	25,08050833	24,68612467	4,54245906
1000	25	0.90	1,833892112	12,54042163	5,036332216	0,501616865	9,23607787	6,290497424	11,96086437	6,29718938
1000	25	0.95	-1,200124213	6,375088473	5,042400248	0,255003539	-6,051506695	1,62567234	5,888355921	5,12232905

**Bibliografie**

- [\*\*\* 2005] \*\*\*, The German Solar Energy Society, *Planning and Installing Photovoltaic Systems*, 2005.
- [\*\*\* 2008] \*\*\*, The German Solar Energy Society, *Planning and Installing Photovoltaic Systems, second edition*, 2008.
- [Agorreta 2009] Agorreta, J. L., Reinaldos, L., González, R., Borrega, M., Balda, J., Marroyo, L., Fuzzy Switching Technique Applied to PWM Boost Converter Operating in Mixed Conduction Mode for PV Systems, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 56, nr. 11, 2009, pp. 4363-4373.
- [Alam 2010] Alam, M. S., Alouani, A. T., Dynamic modeling of photovoltaic module for real-time maximum power tracking, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 2, 2010.
- [ASTM 1036] <http://www.astm.org/Standards/E1036.htm>
- [Åström 1997] Åström K. S., Wittemark, B., Computer-Controlled Systems, Prentice Hall, 1997.
- [Bouzidi 2007] K. Bouzidi, M. Chegaar, N. Nehaoua, New method to extract the parameters of solar cells from their illuminated I-V curve, 4<sup>th</sup> International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007, 2007.
- [Brea 2010] Brea, E. A. J., Ortiz-Rivera, E. I., Salazar-Llinas A., Gonzalez-Llorente, J., Simple Photovoltaic Solar Cell Dynamic Sliding Mode Controlled Maximum Power Point Tracker for Battery Charging Applications, *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2010, pp. 666-671.
- [Campbell 2007] Campbell, R. C., A Circuit-based Photovoltaic Array Model for Power System Studies, *Power Symposium NAPS'07*, 2007, pp.97-101.
- [Castaner 2002], Castaner L., Silvestre S., "Modelling Photovoltaic Systems using PSpice", John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, 2002.
- [Călin 1976] Călin S., Regulateoare automate, Editura didactică și pedagogică, București, România, 1976.
- [Călin 1985] Călin S, Dumitrache I., Regulateoare automate, Editura didactică și pedagogic, București, România, 1985.
- [Chao 2010] K.-H. Chao, C.-J. Li, An intelligent maximum power point tracking method based on extension theory for PV systems, *Expert Systems with Applications*, vol. 37, 2010, pp. 1050-1055.
- [Chegaar 2004a] M. Chegaar, Z. Ouennoughi, F. Guechi, Extracting dc parameters of solar cells under illumination, *Vacuum*, vol. 75, 2004, pp. 367-372.
- [Chegaar 2004b] Chegaar, M., Ouennoughi, Z., Guechi, F., Langueur, H., Determination of Solar Cells Parameters under Illuminated Conditions, *Journal of Electron Devices*, vol. 2, 2003, pp. 17-21.
- [Chirarattananona 2007] Chirarattananona, S., Rukkwansukb, P., Chaiwivatworakula, P., Pakdeepo, P., Evaluation of vertical illuminance and irradiance models against data from north Bangkok, *Journal of Building and Environment*, Volume 42, Issue 11, November 2007, pp. 3894-3904.
- [Chouder 2012] Chouder, A., Silvestre, S., Sadaoui, N., Rahmani, L., Modeling and simulation of a grid connected PV system based on the evaluation of main PV module parameters, *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 20, 2012, pp. 46-58.
- [Chu 2009] Chu, C.-C., Chen, C.-L., Robust maximum power point tracking method for photovoltaic, *Solar Energy*, 2009.



- [Cirrincione 2008] Cirrincione, M., Di Piazza, M. C., Pucci, M., Vitale, G., Real-time Simulation of Photovoltaic Arrays by Growing Neural Gas Controlled DC-DC Converter, *Power Electronics Specialists Conference, 2008*, pp. 2004-2010.
- [datasheet pv1] <http://www.marlec.co.uk/wp-content/uploads/2010/07/BP-4180T.pdf>, 2011, iunie 01.
- [datasheet pv2] [http://www.lpelectric.ro/en/products/solar/panels\\_he\\_en.html#22](http://www.lpelectric.ro/en/products/solar/panels_he_en.html#22), 2011, iunie 01.
- [Dolan 2010] Dolan, D., Durago, J., Crowfoot, J., Taufik, Simulation of A Photovoltaic Emulator, *Proc. of 2010 North American Power Symposium, 2010*.
- [Dragomir 2010a] Dragomir, T. L., Petreuş, D. M., **Petcuţ, F. M.**, Ciocan, I. C., Comparative analysis of identification methods of the photovoltaic panel characteristics, *Proc. IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics - AQTR 2010*, Cluj-Napoca, Romania, vol. 3, 2010, pp 64-69.
- [Dragomir 2010b] Dragomir, T. L., **Petcuţ, F. M.**, Dragomir, L. E., Maximum Power Point Determination for a Photovoltaic Panel using a Simulink Model, 4th International Workshop on Soft Computing Applications, 15-17 July, Arad, Romania, 2010, pp 221-224.
- [Dragomir 2010c] Dragomir T. L., **Petcuţ F. M.**, Look Up Models for Maximum Power Point of Photovoltaic Panels, *The V-th Int. Conf. of ASTR*, Editura AGIR, Craiova, Romania, 2010, pp 289-296.
- [Dragomir 2012] Dragomir, T. L., **Petcuţ, F. M.**, Korodi, A., Value Generator of Maximum Power Point Coordinates of the Photovoltaic Panel External Characteristic, *Engineering - Computational Inteligence and complexity*, vol. 417, Editura Springer, mai 2012.
- [Drăgan 2007] Drăgan F., Analiza comportamentului de tip haotic al sistemelor cu aplicaţii în studiul unor convertoare electronice, *Teze de doctorat – Universitatea "Politehnica" din Timişoara*, 2007.
- [Drechsel 1996] D. Drechsel – Regelbasierte Interpolation und fuzzy control, Vieweg, 1996.
- [DS1103] <http://www.dSPACEinc.com/en/pub/home/products/hw/singbord/ppconbo.cfm>
- [Dumitrache 1980] Dumitrache. I, Tehnica reglării automate, Editura didactică și pedagogică, Bucureşti, România, 1980, pp. 342-364.
- [Duran 2008] Duran, E., Piliouline, M., Sidrach-de-Cardona, M., Galan, J., Andujar, J. M., Different methods to obtain the I-V curve of PV modules: A review, *Photovoltaic Specialists Conference, 2008. PVSC '08. 33rd IEEE*, 11-16 May 2008, pp.1-6.
- [Extech 32280] <http://www.extech.com/instruments/resources/datasheets/382280.pdf>
- [Extech 32280\_manual] [http://www.extech.com/instruments/resources/manuals/382280\\_UM.pdf](http://www.extech.com/instruments/resources/manuals/382280_UM.pdf)
- [Femia 2009] Femia, N., Petrone, G., Spagnuolo, G., Vitelli, M., A Technique for Improving P&O MPPT Performances of Double-Stage Grid-Connected Photovoltaic Systems, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 56, nr. 11, 2009, pp. 4473-4482.
- [Föllinger 1987] Föllinger, O., Nichtlineare Regelungen II, Oldenbourg Verlag, München – Wien, 1987.

- [Francisco 2005] Francisco, M.G.L., "Model of Photovoltaic Module in Matlab", 2do Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación (II Cibelec 2005).
- [Gules 2008] Gules, R., Pacheco, J.D.P., Hey, H.L., Imhoff, J., A Maximum Power Point Tracking System With Parallel Connection for PV Stand-Alone Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, 2008, pp. 2674-2682.
- [IEC 60904]  
[http://webstore.iec.ch/preview/info\\_iec609041%7Bed2.0%7Den\\_d.pdf](http://webstore.iec.ch/preview/info_iec609041%7Bed2.0%7Den_d.pdf)
- [Iggidr 1996] Iggidr, A., Bensoubaya, M., Stability of Discrete-time System: New Criteria and Application to Control Problem, *Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique, Rapport de Recherche – Theme 4*, nr. 3003, sept. 1996, pp. 1-18.
- [Ilango 2010] Ilango, G. S., Rao, P. S., Karthikeyan, A., Nagamani, C., Single-stage sine-wave inverter for an autonomous operation of solar photovoltaic energy conversion system, *Renewable Energy*, vol. 35, 2010, pp. 275–282.
- [Ishaque 2011a], Ishaque, K., Salam, Z., Taheri, H., Syafaruddin, A., Modeling and simulation of photovoltaic (PV) system during partial shading based on a two-diode model, *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 19, 2011, pp. 1613-1626.
- [Ishaque 2011b] Ishaque, K., Salam, Z., Taheri, H., Shamsudin, A., A critical evaluation of EA computational methods for Photovoltaic cell parameter extraction based on two diode model, *Solar Energy*, vol. 85, 2011, pp. 1768-1779.
- [Ishaque 2011c] Ishaque, K., Salam, Z., Taheri, H., Simple, fast and accurate two-diode model for photovoltaic modules, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 95, 2011, pp. 586-594.
- [Ishaque 2011d] Ishaque, K., Salam, Z., Syafaruddin, A comprehensive MATLAB Simulink PV system simulator with partial shading capability based on two-diode model, *Solar Energy*, vol. 85, 2011, pp. 2217-2227.
- [Ito 2011] Ito, M., Kudo, M., Nagura, M., Kurokawa, K., A comparative study on life cycle analysis of 20 different PV modules installed at the Hokuto mega-solar plant, *Progress in Photovoltaics: Research and Application*, nr. 19, 2011, pp:878-886.
- [Kacira 2004] M. Kacira, M. Simsek, Y. Babur, S. Demirkol, Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey, *Renewable Energy*, vol. 29, 2004, pp. 1265-1275.
- [Kalirasu 2010] Kalirasu, A., Dash, S. S., Simulation of Closed Loop Controlled Boost Converter for Solar Installation, *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 7, nr. 1, 2010, pp. 121-130.
- [Kassis 2010] Kassis, A., Saad, M., Analysis of multi-crystalline silicon solar cells at low illumination levels using a modified two-diode model, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 94, 2010, pp. 2108-2112.
- [Kasten 1989], F., Young, A. T., Revised optical air mass tables and approximation formula. *Applied Optics* vol. 28, 1989, pp. 4735–4738.
- [Katz 2001] Katz, E. A., Faiman, D., Tuladhar, S. M., Kroon, J. M., Wienk, M. M., Fromherz, T., Padinger, F., Brabec, C. J., Sariciftci, N. S., Temperature dependence for the photovoltaic device parameters of polymer-fullerene solar cells under operating conditions, *Journal of Applied Physics*, vol. 90, 2001, pp. 5343-5350.

- [Khan 2010] Khan, F., Singh, S. N., Husain, M., Effect of illumination intensity on cell parameters of a silicon solar cell, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 94, 2010, pp. 1473–1476.
- [Knopf 1999] H. Knopf, Analysis, Simulation, and Evaluation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Methods for a Solar Powered Vehicle, *Master Thesis*, Portland State University, 1999.
- [Korodi 2011] Korodi A., **Petcuț F. M.**, Dragomir T. L., Interpolative Based Implementation of a Photovoltaic Panel, *Proceeding of 19th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Grecia, 2011.
- [Koutroulis 2009] Koutroulis, E., Kalaitzakis, K., Tzitzilonis, V., Development of an FPGA-based system for real-time simulation of photovoltaic modules, *Microelectronics Journal*, vol. 40, 2009, pp. 1094-1102.
- [Lal 2007] Lal, P. M., Singh, S. N., A new method of determination of series and shunt resistances of silicon solar cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 91, 2007, pp. 137–142.
- [Landau 2002] Landau, C.R., *Optimum orientation of solar panels*, [www.macslab.com/optosolar.html](http://www.macslab.com/optosolar.html), 2002, pp. 1-5.
- [Larsen 2001] Larsen, M., Kokotovic, P. V., A brief look at the Tsytkin criterion: from analysis to design, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2001; nr. 15, pp.121-128.
- [Lee 2011] Lee, W., Kim, Y., Wang, Y., Chang, N., Pedram, M., and Han, S., Versatile High-Fidelity Photovoltaic Module Emulation System, *Low Power Electronics and Design, International Symposium on Digital Object Identifier*, 2011, pp. 91-96.
- [Li 2007] Li, H.W.D., Lam, T.N.T., Determining the Optimum Tilt Angle and Orientation for Solar Energy Collection Based on Measured Solar Radiance Data, *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy*, vol. 2007, Article ID 85402.
- [Lim 2000] Y. H. Lim, D.C. Hamill, Simple maximum power point tracker for photovoltaic arrays, *Electronics Letters 25th*, vol. 36, nr. 11, 2000.
- [Liquan 2009] Liquan, L., Zhixin, W., A Variable Voltage MPPT Control Method for Photovoltaic Generation System, *WSEAS Transaction on Circuits and Systems*, vol. 8, 2009, pp. 335-349.
- [Lo 2009] Lo, Y. K., Chiu, H. J., Lee, T. P., Purnama, I., Wang, J. M., Analysis and Design of a Photovoltaic System DC Connected to the Utility With a Power Factor Corrector, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 56, nr. 11, 2009, pp. 4354-4362.
- [Lopes 2003] Lopes, L. A. C., Lienhardt, A. M., A Simplified Nonlinear Power Source for Simulating PV Panels, *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist*, vol. 4, 2003, pp 1729-1734.
- [Lorenz 2011] Lorenz, E., Scheidsteger, T., Hurka, J., Heinemann, D., Kurz, C., Regional PV power prediction for improved grid Integration, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2011, pp. 757–771.
- [Mahdi 2010] Mahdi, A. J., Tang, W. H., Wu, Q. H., Improvement of a MPPT Algorithm for PV Systems and Its Experimental Validation, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Granada, Spania, 2010,
- [Marion 2002] B. Marion, A Method for Modeling the Current–Voltage Curve of a PV Module for Outdoor Conditions, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2002; vol. 10, pp. 205–214.

- [Marion 2004] Marion, B., Rummel, S., Anderberg, A., Current-Voltage Curve Translation by Bilinear Interpolation, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol.12, 2004, pp. 593-607.
- [Marcos 2011] Marcos, J., Marroyo, L., Lorenzo, E., Alvira, D., Izco, E., From irradiance to output power fluctuations: the pv plant as a low pass filter, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2011, vol. 19, pp.505-510.
- [Masri 2010] Masri, S., Chan, P. W., *Development of a Microcontroller-Based Boost Converter for Photovoltaic System*, European Journal of Scientific Research, vol. 41, nr. 1, 2010, pp.38-47.
- [Mitroi 2011] Mitroi, M. R., Iancu, V., Fara, L., Magdalena Lidia Ciurea, Numerical analysis of J-V characteristics of a polymer solar cell, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 19, 2011, pp. 301-306.
- [Moldovan 2009] Moldovan N., Picos R., Moreno E. G. (2009). Parameter extraction of a Solar Cell Compact Model using Genetic Algorithms, *Proceedings of the 2009 Spanish Conference of Electron Devices*, Santiago de Compostela, Spain, p.379-382.
- [Mukerjee 2007] Mukerjee, A. K., Dasgupta, N., DC power supply used as photovoltaic simulator for testing MPPT algorithms, *Renewable Energy*, nr. 32, 2007, pp. 587-592.
- [Nehaoua 2010] Nehaoua, N., Chergui, Y., Mekki, D. E., Determination of organic solar cell parameters based on single or multiple pin structures, *Vacuum*, vol. 84, 2010, pp. 326-329.
- [Nooriana 2008] Nooriana, A. M., Moradib, I., Kamali, G. A., Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces, *Renewable Energy*, vol. 33, 2008, pp. 1406-1412.
- [Park 2004] Park, M., Yu, I. K., A Novel Real-Time Simulation Technique of Photovoltaic Generation Systems Using RTDS, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 19, 2004, pp. 164-169.
- [Park 2010] Park, S.H., Cha, G.R., Jung, Y.C., Won, C.Y., Design and Application for PV Generation System Using a Soft-Switching Boost Converter With SARC, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 57, 2010, pp. 515-522.
- [Partridge 1976] Partridge, G. W., Platt, C. M. R., *Radiative Processes in Meteorology and Climatology*, Elsevier 1976.
- [Perez 1987] Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Menicucci, D., A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy*, vol. 39 (3), 1987, pp. 221-231.
- [Perez 1990] Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., Stewart, R., Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance, *Solar Energy*, vol.44 (5), 1990, pp.271- 289.
- [Petcuț 2010a] **Petcuț, F. M.**, Dragomir, T. L., Solar Cell Parameter Identification Using Genetic Algorithms, *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, vol. 12, no.1, 2010, pp. 30-37.
- [Petcuț 2010b] **Petcuț, F. M.**, Dragomir, T. L., Raport științific nr. 1 cu rezultate intermediare ale cercetării, 2010.
- [Petcuț 2011] **Petcuț, F. M.**, Dragomir, T. L., Raport științific nr. 2 cu rezultate intermediare ale cercetării, 2011.
- [Petreuş 2008] Petreuş D., Fărcaş C., Ciocan I., *Modelling and Simulation of Photovoltaic Cells*, Acta Tehnica Napocensis, volume 49, no. 1/2008, pp. 42-47.

- [Petreuş 2009] Petreuş, D.M., Ciocan, I.C., Rusu, A.R., Cadar, D.V., Maximum Power Point Tracking Simulator in Charging Photovoltaic Systems, *Acta Technica Napocensis Electronics and Telecommunications*, vol. 50, nr. 2, 2009.
- [Petreuş 2010] D. Petreuş, D. Moga, A. Rusu, T. Pătăraşu, M. Munteanu, Photovoltaic System with Smart tracking of the Optimal Working Point, *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, Nr 3, 2010.
- [Petreuş 2011] D. Petreuş, T. Pătăraşu, S. Dărăban, C. Morel, B. Morley, A novel maximum power point tracker based on analog and digital control loops, *Solar Energy*, vol. 85, 2011, pp. 588-600.
- [Pettersson 2009] J. Pettersson, C. Platzer-Björkman, M. Edoff, Temperature-dependent Current-voltage and Lightsoaking Measurements on Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Solar Cells with ALD-Zn<sub>1</sub>-Mg<sub>x</sub>O Buffer Layers, *Progress in Photovoltaics Research and Application*, 2009, vol. 17, pp. 460-469.
- [Piazza 2009] Piazza, M. C. Di, Ragusa, A., Vitale, G., Identification of Photovoltaic Array Model Parameters by Robust Linear Regression Methods, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'09)*, Valencia, Spain, nr. 15, 2009.
- [Piazza 2010] Di Piazza, M. C., Pucci, M., Ragusa, A., Vitale, G., A Grid-Connected System Based on a Real Time PV Emulator: Design and Experimental set-up, *36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2010, pp. 3237 – 3243.
- [Philipps 2008] Philipps, S.P., Stretter, D., Hoheisel, R., Hermle, M., Diamond, F., Bett, A.W., Characterisation and numerical modeling of the temperature-dependent behavior of glass solar cells, *23<sup>rd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2008, Valencia, Spain.
- [Popov 2010] Popov D., Pop N., *Bazele fizice ale conversiei fotovoltaice*, Editura Politehnica Timișoara 2010.
- [Preitl 1996] Preitl, S., Precup, R.E., Porum, A., Elemente de reglare automată, vol. 1, UPT, Timișoara, România, 1996.
- [PV\_P1] <http://www.ld-didactic.com/phk/produkte.asp>
- [PV\_P2] ASE-30-DG-UT (68V/32W), Dünnschichta Solarmodule Opak of RWE Solar GmbH, <http://www.corona-berlin.de/download/30dgut.pdf>
- [PV1] <http://www.perlightsolar.com.cn/english/products2.asp> , 2011, mai 20.
- [PV2] [http://www.thousandsuns.com/80+watt+solar+panel/p432875\\_1536882.aspx](http://www.thousandsuns.com/80+watt+solar+panel/p432875_1536882.aspx) , 2011, mai 20.
- [PV3] <http://www.oksolar.com/pv/astropower.html> , 2011, mai 20
- [PV4] <http://www.bolpv.com/en/BOL-10M.asp> , 2011, mai 20.
- [PV5] <http://www.hopesolar.com.cn/en/cp12.asp> , 2011, mai 20.
- [PV6] [http://www.bluetechsolar.com/products\\_info.asp?id=4](http://www.bluetechsolar.com/products_info.asp?id=4) , 2011, mai 20.
- [PV7] <http://www.bsolar.net/productview.asp?bigclass=29> , 2011, mai 20.
- [PV8] [http://www.bheledn.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=33&Itemid=1](http://www.bheledn.com/index.php?option=com_content&task=view&id=33&Itemid=1) , 2011, mai 20.
- [PV9] <http://www.bp.com/sectiongenericarticle.do?categoryId=9035987&contentId=7066665> , 2011, mai 20.
- [PV10] <http://www.fvgenergy.ws/web/en/department/49/FVG-25M.html> , 2011, mai 20.
- [PV11] <http://www.deutschezell.de/index.php?id=2194> , 2011, mai 20.
- [PV12] <http://www.nbloyal.com/solar-panel> , 2011, mai 20.

- [Rahim 2010] Rahim, N. A., Selvaraj, J., Multistring Five-Level Inverter With Novel PWM Control Scheme for PV Application, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 57, 2010, pp. 2111-2123.
- [Robinson 2003] Robinson, D., Climate as a Pre-Design Tool, Proceedings of the Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, August 11-14, 2003, pp. 1109-1116.
- [Salhi 2009] Salhi, M., El-Bachtiri, R., Maximum Power Point Tracking Controller for PV Systems using a PI Regulator with Boost DC/DC Converter, *ICGST-ACSE Journal*, vol 8, nr.3 III, 2009, pp. 21-27.
- [Sera 2006] Sera, D., Kerekes, T., Teodorescu, R., Blaabjerg, F., Improved MPPT Algorithms for Rapidly Changing Environmental Conditions, *12th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Portoroz, 2006, pp. 1614 - 1619.
- [Sera 2008a] Sera, D., Teodorescu, R., Hantschel, J., Knoll, M., Optimized Maximum Power Point Tracker for fast changing environmental conditions, *Industrial Electronics, International Symposium on Issue Date*, Cambridge, 2008, pp. 2401 - 2407.
- [Sera 2008b] Sera, D.; Valentini, M.; Raducu, A., Real Time Photovoltaic Array Simulator for Testing Grid-Connected PV Inverters, *Proceedings of the International Symposium on Industrial Electronics*, 2008, pp 2550-2554.
- [Singh 2008] Singh, P., Singh, S. N., Lal, M., Husain, M., Temperature dependence of I-V characteristics and performance parameters of silicon solar cell, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 92, 2008, pp. 1611-1616.
- [Skoplaki 2009] Skoplaki, E., Palyvos, J. A., On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations, *Solar Energy*, vol. 83, 2009, pp 614-624.
- [Soga 1999] Soga, K., Akasaka, H., Nimiya, H., A Comparison of Methods to Estimate Hourly Total Irradiation on Tilted Surfaces from Hourly Global Irradiation on a Horizontal Surface, Proc. of Sixth International Conference Building Simulation '99, Kyoto, Japan, 1999, pp. 635-642.
- [Soto 2006] Soto, W. De, Klein, S. A., Beckman, W. A., Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance, *Solar Energy*, vol. 80, 2006, pp. 78-88.
- [Tafticht 2008] Tafticht, K. Agbossou, M.L. Doumbia, A. Cheriti, An improved maximum power point tracking method for photovoltaic systems, *Renewable Energy*, vol. 33, 2008, pp.1508-1516.
- [Teng 2010] Teng, T. P., Nieh, H. M., Chen, J. J., Lu, Y. C., Research and development of maximum power transfer tracking system for solar cell unit by matching impedance, *Renewable Energy*, vol. 35, 2010, pp. 845-851.
- [Truntic 2011] Truntic, M., Milanovic, M., Jezernik, K., Discrete-event switching control for buck converter based on the FPGA, *Control Engineering Practice*, vol. 19, nr. 5, 2011, pp. 502-512.
- [Tsuno 2009] Tsuno, Y., Hishikawa, Y., Kurokawa, K., Modeling of the I-V curves of the PV modules using linear interpolation/extrapolation, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 93, 2009, pp. 1070-1073.
- [Valentini 2008] Valentini, M., Raducu, A., Sera, D., Teodorescu, R., PV Inverter Test Setup for European Efficiency Static and Dynamic MPP Efficiency Evaluation, *Proc. of Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 11th International Conference on OPTIM 2008*, Brasov, Romania, 2008, pp. 433-438.

- [Van der Borg 2003] Van der Borg, N. J. C. M., Burgers, A. R., Inverter Undersizing in PV Systems, Proceedings of 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, vol. 2, 2003, pp. 2066-2069.
- [Walker 2004] Walker, G. R., Sernia, P. C., Cascaded DC-DC Converter Connection of Photovoltaic Modules, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, nr. 4, 2004, pp. 1130-1139.
- [Wang 2006] Wang, Q., Tenhunen, J., Schmidt, M., Kolcun, O., Droesler, M., Reichstein, M., Estimation of total, direct and diffuse PAR under clear skies in complex alpine terrain of the National Park Berchtesgaden, Germany, *Ecological Modelling*, vol. 196, nr. 1-2, 2006, pp. 149-162.
- [Wang 2011] Wang, Y. J., Hsu, P. C., An investigation on partial shading of PV modules with different connection configurations of PV cells, *Energy*, vol. 36, nr. 5, 2011, pp. 3069-3078.
- [wiki 2011] [http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic\\_cell](http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_cell) , 2011, iunie 01.
- [Xiao 2004] Xiao, W., Dunford, W. G., Evaluating Maximum Power Point Tracking Performance by Using Artificial Lights, *30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Busan, Korea, 2004, pp. 2883-2887.
- [Yang 2007a] Yang, H., Lu, L., Zhou, W., A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system, *Solar Energy*, vol. 81, nr. 1, 2007, pp. 76-84.
- [Yang 2007b] Yang, H., The Optimum Tilt Angles and Orientation of PV Claddings for Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Application, *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 159, 2007, pp. 253-255.
- [Zainudin 2010] Zainudin, H. N., Mekhilef, S., Comparison Study of Maximum Power Point Tracker Techniques for PV Systems, *Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference*, Cairo, Egipt, 2010, pp. 750-755.