

## **Rezumatul tezei de doctorat cu titlul:**

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

**elaborată de ing. Flavius-Maxim PETCUȚ**

**Coordonator prof. dr. ing. Toma-Leonida DRAGOMIR**

### **Domeniul și obiectivele tezei**

La ora actuală nu există un model matematic standard pentru caracteristicile dispozitivelor 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 parametrii. 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 ca având orientarea intrare-ieșire tocmai *de la* factori de mediu externi, care declanșează procesele de conversie fotovoltaică, *la* caracteristici. Această abordare este prezentată în capitolul 2, în experimentele pe emulator prezentate în capitolul 3 și prin ansamblul aplicativ din capitolul 4.

Punctul de funcționare al unui dispozitiv fotovoltaic depinde de caracteristica dispozitivului și de caracteristica circuitului extern, în cazul general ambele fiind variabile. Caracteristica dispozitivului fotovoltaic se modifică odată cu modificarea intensității factorilor externi, deci, principal, caracteristica dispozitivului se modifică în permanență.

Cu cât modelele matematice ale dispozitivelor surprind mai îndeaproape procesele din celulă ele cu atât ele sunt mai complexe și numărul parametrilor folosiți în model este mai mare. Relațiile de dependență sunt de tip transcendent. Aceasta face ca problema identificării parametrilor să fie mai dificil de soluționat. În acest context modelarea și identificarea dispozitivelor fotovoltaice sunt probleme de actualitate. De dată recentă este și utilizarea de modele numerice 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, să atingă trei obiective legate de modelele dispozitivelor fotovoltaice și utilizarea lor:

- i) sistematizarea, clarificarea și completarea cunoștințelor și tehnicilor folosite pentru modelarea dispozitivelor fotovoltaice,
- ii) realizarea unui emulator de panouri fotovoltaice și
- iii) 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.

### **Documentarea tezei și amplasarea contribuțiilor tezei în referențialul creat**

*În capitolul 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 extins [Chegaar 2004a], [Chegaar 2004b], [Park 2004], [\*\*\* 2005], [Francisco 2005], [Soto 2006], [Bouzidi 2007], [Campbell 2007], [Lal 2007], [Petreuş 2008], [Tafticht 2008], [\*\*\* 2008], [Chu 2009], [Liquin 2009], [Moldovan 2009], [Petreuş 2009], [Piazza 2009], [Alam 2010], [Khan 2010], [Nehaoua 2010], [Lee 2011], [Mitroi 2011], [Chouder 2012]. În practică sunt folosite frecvent și 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. 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.

*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 jos menționate.*

Realizarea unor emulatoare de panouri fotovoltaice, destinate substituirii 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 modelul 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 în literatură 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]). *Soluția propusă în teză folosește M-2D iar pentru implementare o sursă de tensiune programabilă comandată cu ajutorul unei plăci dSPACE.*

*În capitolul 4 este tratată determinarea pe bază de modele a punctului de putere maximă (MPP) pentru panourile fotovoltaice.* Determinarea 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 radiație 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 dificultate 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 modelele matematice din cadrul capitolului 2, iar în al doilea rând posibilitatea de folosire a structurilor de conducere actuale bazate pe strategii specifice sistemelor extreme.

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 radiație 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.

## **Rezultate obținute**

Rezultatele obținute, precizate în continuare sunt ordonate în funcție de obiectivele propuse.

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 parametrice 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 principiul 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 parametri  $\theta$  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 criteriului 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. Verificare 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.

### **Contribuții personale:**

Contribuțiile personale ale autorului tezei în contextul obiectivelor și rezultatelor prezentate în paragraful anterior au fost:

i.a) Sistematizarea 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 Țîpkin.

ii.c) Studiarea experimentală 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 extremale pas cu pas”, respectiv „sistemelor extremale 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 studierea 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. Studiarea 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 în calitate de autor sau coautor.

Pe parcursul stagiului doctoral am publicat 5 lucrări științifice, am redactat 2 rapoarte de cercetare [Petcuț 2010b] și [Petcuț 2011], și am elaborat o lucrare în curs de publicare.

- [Dragomir 2010a] Dragomir, T. L., Petreuş, D. M., **Petcuț, 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 - AQTR 2010, (Xplore și Scopus),
- [Dragomir 2010b] Dragomir, T. L., **Petcuț, 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 - SOFA 2010, (Xplore și Scopus),
- [Dragomir 2010c] Dragomir T. L, **Petcuț 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,

- [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 - CEAI – (ISI și Scopus),
- [Petcuț 2010b] **Petcuț, F. M.**, Dragomir, T. L., Raport științific nr. 1 cu rezultate intermediare ale cercetării, 2010,
- [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 - MED 2011, (Xplore și Scopus),
- [Petcuț 2011] **Petcuț, F. M.**, Dragomir, T. L., Raport științific nr. 2 cu rezultate intermediare ale cercetării, 2011,
- [Dragomir 2012] Dragomir, T. L., **Petcuț, F. M.**, Korodi, A., Value Generator of Maximum Power Point Coordinates of the Photovoltaic Panel External Characteristic, *Engineering - Computational Intelligence and complexity*, vol. 417, Editura Springer, mai 2012 - în curs de apariție.