



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMFOSDRU



Fondul Social European
POS DRU 2007-2013



Instrumente Structurale
2007-2013



MINISTERUL
EDUCAȚIEI
CERCETĂRII
TINERETULUI
ȘI SPORTULUI
OIPOSDRU



Investește în oameni!

FONDUL SOCIAL EUROPEAN

Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013

Axa prioritară 1 „Educație și formare profesională în sprijinul creșterii economice și dezvoltării societății bazate pe cunoaștere”

Domeniul major de intervenție 1.5 „Programe doctorale și post-doctorale în sprijinul cercetării”

Titlul proiectului: „Investiție în dezvoltare durabilă prin burse doctorale (INED)”

Numărul de identificare al contractului: POSDRU/88/1.5/S/59321

Beneficiar: Universitatea Transilvania din Brașov

Universitatea *Transilvania* din Brașov

Școala Doctorală Interdisciplinară

Centrul de cercetare: *Sisteme de Energii Regenerabile și Reciclare*

Ing. Nicoleta - Irina TATU

**Analiza și optimizarea mecanismelor de orientare
pentru șiruri de module fotovoltaice**

**Analysis and optimization of the tracking mechanisms
for strings of photovoltaic modules**

Conducător științific

Prof. dr. ing. Cătălin ALEXANDRU

BRAȘOV, 2012

D-lui (D-nei)

COMPONENȚA
Comisiei de doctorat

Numită prin ordinul Rectorului Universității „Transilvania” din Brașov
Nr. 5330 din 26.07.2012

PREȘEDINTE:	Prof. dr. ing. Codruța JALIU Universitatea Transilvania din Brașov
CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:	Prof. dr. ing. Cătălin ALEXANDRU Universitatea Transilvania din Brașov
REFERENȚI:	Prof. dr. ing. Ioan ARDELEAN Universitatea Tehnică din Cluj
	Prof. dr. ing. Nicolae DUMITRU Universitatea din Craiova
	Prof. dr. ing. Gheorghe MOLDOVEAN Universitatea Transilvania din Brașov

Data, ora și locul susținerii publice a tezei de doctorat: 7 decembrie 2012,
ora 10, sala E II 4 (Căsuța solară).

Eventualele aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării vă rugăm să
le transmiteți în timp util, pe adresa nicoleta-irina.tatu@unitbv.ro sau
tatu_irina@yahoo.com.

Totodată vă invităm să luați parte la ședința publică de susținere a tezei de
doctorat.

Vă mulțumim.

CUPRINS

	Teza	Rez
INTRODUCERE	3	-
1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND SISTEMELE DE ORIENTARE PENTRU ȘIRURI DE MODULE FOTOVOLTAICE	6	7
1.1. Cadrul general al sistemelor fotovoltaice	6	7
1.2. Sisteme de orientare pentru module fotovoltaice	13	7
1.3. Mecanisme de orientare pentru șiruri de module fotovoltaice	18	8
1.4. Obiectivele tezei	30	10
2. MODELAREA RADIAȚIEI SOLARE ȘI A LEGII DE MIȘCARE (ORIENTARE)	31	11
2.1. Aspecte generale privind radiația solară	31	11
2.2. Stabilirea programului optim de orientare	36	11
2.2.1. Determinarea zilelor reprezentative din an	37	11
2.2.2. Determinarea perechii optime de unghiuri pentru orientare	39	11
2.2.3. Stabilirea momentului optim de acționare	44	13
2.2.4. Orientare bi-axială versus orientare mono-axială	48	15
2.3. Concluzii și contribuții originale	49	15
3. PROIECTAREA, MODELAREA ȘI SIMULAREA MECANISMULUI DE ORIENTARE PENTRUL ȘIRUL DE MODULE FOTOVOLTAICE	50	17
3.1. Dimensionarea șirului de module din punct de vedere al necesarului de energie electrică	50	17
3.2. Definirea soluției optime a mecanismului de orientare pentru șirul de module fotovoltaice	51	17
3.3. Proiectarea transmisiilor din cadrul mecanismului de orientare	56	18
3.3.1. Influența factorilor externi	57	18
3.3.2. Proiectarea transmisiilor cu roți dințate și lanț	60	18
3.4. Modelarea și simularea mecanismului de orientare a șirului de module fotovoltaice	72	20
3.4.1. Modelarea CAD a mecanismului de orientare	72	20
3.4.2. Analiza mecanismului de orientare în mediu MBS	77	21
3.5. Concluzii și contribuții originale	91	26
4. MODELAREA SISTEMULUI DE CONTROL AL MECANISMULUI DE ORIENTARE	93	28
4.1. Aspecte generale privind procesul de comandă & control	93	-
4.2. Formularea problemei de control	96	28

4.3. Modelarea și simularea sistemului de control	98	28
4.4. Verificarea robusteții sistemului de control	110	31
4.5. Concluzii și contribuții originale.....	113	33
5. PROTOTIPAREA VIRTUALĂ A SISTEMULUI DE ORIENTARE		
PENTRU ȘIRUL DE MODULE FOTOVOLTAICE	115	34
5.1. Platforma software de prototipare virtuală	115	-
5.2. Finisarea prototipului virtual al mecanismului de orientare	118	34
5.3. Modelarea sistemului de orientare în concept mecatronic.....	120	34
5.4. Optimizarea sistemului - sinteza elementelor de control	125	35
5.5. Evaluarea eficienței energetice a sistemului de orientare	143	39
5.6. Concluzii și contribuții originale.....	145	40
6. DEZVOLTAREA ȘI TESTAREA MODELULUI EXPERIMENTAL	147	41
6.1. Dezvoltarea modelului experimental.....	147	41
6.2. Achiziția și prelucrarea datelor experimentale.....	153	43
6.3. Concluzii și contribuții originale.....	155	45
7. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE.		
DISEMINAREA REZULTATELOR	156	46
7.1. Concluzii finale și contribuții originale	156	46
7.2. Diseminarea rezultatelor.....	160	48
7.3. Direcții viitoare de cercetare.....	161	49
BIBLIOGRAFIE	162	50
ANEXE		
Scurt Rezumat	171	52
CV	172	53

CONTENT

	Thesis	Summ.
INTRODUCTION	3	-
1. CURRENT STATE OF RESEARCHES REGARDING THE TRACKING SYSTEMS FOR STRINGS OF PHOTOVOLTAIC MODULES	6	7
1.1. Photovoltaic systems general framework	6	7
1.2. Tracking systems for photovoltaic modules	13	7
1.3. Tracking mechanisms for strings of photovoltaic modules.....	18	8
1.4. Thesis objectives	30	10
2. MODELING THE SOLAR RADIATION AND THE MOTION (TRACKING) LAW	31	11
2.1. General aspects regarding the solar radiation	31	11
2.2. Establishing the optimum tracking program.....	36	11
2.2.1. Determining the representatives days of the year.....	37	11
2.2.2. Determining the optimum pair of angles for tracking.....	39	11
2.2.3. Establishing the optimum actuating moment.....	44	13
2.2.4. Bi-axial versus mono-axial tracking.....	48	15
2.3. Conclusions and original contributions	49	15
3. DESIGNING, MODELING AND SIMULATING THE TRACKING MECHANISM FOR THE STRING OF PHOTOVOLTAIC MODULES ...	50	17
3.1. Dimensioning the string of photovoltaic modules in terms of electrical energy need	50	17
3.2. Defining the optimum solution of the tracking mechanism for the string of photovoltaic modules.....	51	17
3.3. Designing the mechanical transmissions of the tracking mechanism.....	56	18
3.3.1. The influence of the external factors	57	18
3.3.2. Designing the gear and chain transmissions.....	60	18
3.4. Modeling and simulation of the tracking mechanism for the string of photovoltaic modules	72	20
3.4.1. The CAD modeling of the tracking mechanism.....	72	20
3.4.2. Analyzing the tracking mechanism in MBS environment.....	77	21
3.5. Conclusions and original contributions	91	26
4. MODELING THE CONTROL SYSTEM OF THE TRACKING MECHANISM	93	28
4.1. General aspects regarding the command & control process.....	93	-

4.2. The control problem statement	96	28
4.3. The modeling and simulation of the control system	98	28
4.4. Verifying the control system robustness	110	31
4.5. Conclusions and original contributions	113	33
5. VIRTUAL PROTOTYPING OF THE TRACKING SYSTEM FOR THE STRING OF PHOTOVOLTAIC MODULES	115	34
5.1. Virtual prototyping software platform	115	-
5.2. Refining the virtual prototype of the tracking mechanism	118	34
5.3. Modeling the tracking system in mechatronic concept	120	34
5.4. Optimizing the system - control elements synthesis	125	35
5.5. Evaluating the energetic efficiency of the tracking system	143	39
5.6. Conclusions and original contributions	145	40
6. DEVELOPING AND TESTING THE EXPERIMENTAL MODEL	147	41
6.1. Developing the experimental model	147	41
6.2. Acquisition and processing the experimental data	153	43
6.3. Conclusions and original contributions	155	45
7. FINAL CONCLUSIONS AND ORIGINAL CONTRIBUTIONS. RESULTS DISSEMINATION	156	46
7.1. Final conclusions and original contributions	156	46
7.2. Results dissemination	160	48
7.3. Future researches	161	49
BIBLIOGRAPHY	162	50
ANNEXES		
Abstract	171	52
CV	172	53

1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND SISTEMELE DE ORIENTARE PENTRU ȘIRURI DE MODULE FOTOVOLTAICE

1.1. CADRUL GENERAL AL SISTEMELOR FOTOVOLTAICE

Diminuarea continuă a resurselor de combustibili fosili a determinat ca piața energiei să se îndrepte către industria sistemelor de resurse regenerabile, putând obține energie electrică și termică prin metode nedăunătoare mediului și fără poluare, pe scurt obținând energia verde. Astfel, soarele, apa, vântul, energia geotermală și biomasa sunt tot mai folosite pentru a genera energie. Combustibilii fosili reprezintă 82% din resursele de energie de pe glob, 11% energie nucleară, restul fiind energii regenerabile. Chiar dacă combustibilii fosili sunt majoritari, aceștia au un caracter limitativ, în contrast cu rezerva nelimitată oferită de sursele de energii regenerabile. Totuși, consumul de energie generată de acest tip de surse este mai scăzut decât în cazul celorlalte surse de energie. În vederea economisirii resurselor de combustibili fosili, se dorește ca până în 2020 consumul de energie rezultată din combustibili fosili să scadă cu 32% prin utilizarea de tehnologii avansate, boilere cu biomasă, pompe de căldură, sisteme fotovoltaice, sisteme termale etc. Un rezultat nociv al utilizării combustibililor fosili este emisiile de CO₂, care au crescut până în 2010 cu 38% față de 1990, fiind imperativ ca emisiile să fie reduse până în 2050 cu 65% pentru a evita consecințele imprevizibile care pot apărea [121].

1.2. SISTEME DE ORIENTARE PENTRU MODULE FOTOVOLTAICE

O soluție pentru creșterea eficienței sistemelor fotovoltaice constă din utilizarea de mecanisme de orientare, care schimbă poziționarea sistemului pentru a maximiza cantitatea de radiație solară captată.

În funcție de cele două axe de mișcare ale pământului, sistemele de orientare pot fi *bi-axiale* și *mono-axiale*. Sistemele de orientare bi-axiale asigură o poziționare precisă prin efectuarea celor două mișcări, zilnică (mișcarea pământului în jurul propriei axe) și sezonieră (mișcarea pământului în jurul soarelui) [17, 20]. Sistemele de orientare mono-axiale efectuează doar mișcarea zilnică, poziția sezonieră fiind fixată la un unghi optim predefinit locației de amplasare, numit unghi de elevație [32, 86].

Sistemele de orientare bi-axiale pot fi clasificate în 4 categorii, **funcție de amplasarea axelor de mișcare**: ecuatoriale, pseudo-ecuatoriale, azimutale și pseudo-azimutale. Sistemele de orientare *ecuatoriale* au ca axă fixă axa mișcării diurne, care este paralelă cu axa polară. Axa mișcării de elevație este variabilă în funcție de axa diurnă. Axa fixă a sistemelor de orientare *pseudo-ecuatoriale* este axa mișcării de elevație, care este dispusă orizontal, paralelă cu axa Est - Vest. Sistemele de orientare *azimutale* au ca axă fixă axa mișcării diurne (azimutale), care este dispusă pe verticală (perpendiculară pe planul observatorului). Axa mișcării altitudinale (elevație) variază în funcție de axa diurnă, fiind necesară corelarea celor două mișcări de-a lungul zilei. La fel ca în cazul sistemelor azimutale, sistemele de orientare *pseudo-azimutale* au ca axă fixă axa mișcării diurnă, dar care în acest caz este dispusă pe orizontală, fiind paralelă cu axa Sud - Nord; axa variabilă este axa mișcării altitudinale (elevație).

Având în vedere **principiul de funcționare**, se pot identifica două tipuri fundamentale de sisteme de orientare: pasive și active. Funcționarea *sistemelor de orientare pasive* se bazează de regulă pe expansiunea termică a unui lichid pe bază de Freon, de la un colț al sistemului spre celălalt, datorită sensibilității la căldură a fluidului de lucru [27]. *Sistemele de orientare active* sunt sisteme mecatronice, bazate pe dispozitive de poziționare acționate, de regulă, electric, care includ motoare, reductoare de turație, mecanisme, cuplaje etc. În general, sistemele actuale sunt bazate pe mecanisme cu bare articulate, mecanisme cu roți dințate, transmisii cu lanț sau curea. Orientarea modulelor fotovoltaice prin sisteme active poate crește eficiența sistemului de conversie cu valori între 20% și 50% relativ la situația panoului fix [16, 56].

În ceea ce privește **controlul sistemelor de orientare active**, literatura prezintă cu predilecție *sisteme în circuit închis* [16], bazate pe utilizarea de fotosenzori, care sunt responsabili pentru discretizarea poziției soarelui și transmiterea semnalelor electrice către controlerul de comandă a motoarelor. Alternativa o constituie *sistemele de control în circuit deschis* [66], bazate pe algoritmi/programe care furnizează parametri predefiniți de control pentru motoare, în funcție de pozițiile soarelui pe bolta cerească (mișcările astronomice ale sistemului pământ - soare). O altă soluție constă din *sistemele hibride*, care încorporează un anumit tip de senzor de poziție pentru a căuta și calibra automat sistemul de control astronomic. În plus, sistemul de orientare poate fi ajustat pentru a furniza maximumul de energie, a se autopozitiona inițial sau autocorecta pe durata ciclului de funcționare [70].

Din punct de vedere al **elementului de control - controlerul**, literatura prezintă diferite soluții, de la controlere clasice din familia PID (Proportional-Integral-Derivative) până la controlere moderne de tip robust sau adaptiv (Fuzzy Logic Controller - FLC). O altă soluție este reprezentată de *sistemele de orientare inteligente*, capabile să se adapteze condițiilor meteorologice, prin luarea de decizii de orientare în concordanță cu seturile de date înregistrate în mediu real – radiația solară, temperatură, vânt etc. [41].

Sistemul de control poate fi proiectat să considere mai mulți **parametri monitorizați**, astfel încât strategiile de control folosite pentru sistemele de orientare fotovoltaice pot fi clasificate după cum urmează: sisteme cu *o buclă de control* - se monitorizează de regulă, poziția unghiulară a sistemului; sisteme cu *două bucle de control* [80] - se monitorizează poziția și viteza; sisteme cu *trei bucle de control* - se monitorizează poziția, viteza și curentul.

1.3. MECANISME DE ORIENTARE PENTRU ȘIRURI DE MODULE FOTOVOLTAICE

Realizarea câmpurilor de module fotovoltaice a apărut ca o necesitate pentru dezvoltarea unor sisteme mari producătoare de energie electrică din energie solară. În practică, se întâlnesc diverse tipuri de câmpuri fotovoltaice cu orientare [78]: *module fotovoltaice independente, platforme fotovoltaice, șiruri (stringuri) fotovoltaice, platforme de șiruri de module fotovoltaice*.

Șirul de module fotovoltaice poate genera probleme constructive datorită mecanismelor de transmitere a mișcării de la sursa motoare la toate modulele din șir, dar permite creșterea eficienței energetice și economice prin minimizarea numărului de surse motoare necesare acționării tuturor modulelor din șir (sursa motoare controlată fiind cea mai scumpă componentă dintr-un sistem de orientare). O problemă specifică câmpurilor fotovoltaice o constituie dispunerea șirurilor de module în funcție de aria de acoperire și de necesarul de energie electrică. În principiu, dispunerea poate fi în linie sau în coloană.

Șirurile de module fotovoltaice pot fi clasificate din punct de vedere al **mecanismului de transmitere a mișcării între module**, după cum urmează: transmiterea mișcării prin *mecanisme cu bare articulate* (de regulă, mecanism paralelogram); transmiterea mișcării prin *mecanisme cu roți dințate* (de regulă, angrenaje pinion – cremalieră); transmiterea mișcării prin *fir sau cablu*; transmiterea mișcării prin *curele sau lanțuri*.

Din punct de vedere al **modului de transmitere a mișcării**, mecanismele de orientare pentru șiruri fotovoltaice pot fi clasificate astfel: *mecanisme cu transmiterea mișcării în paralel* - mișcarea se transmite simultan de la sursa motoare la toate modulele din șir printr-un element central.; *mecanisme cu transmiterea mișcării în serie* - mișcarea se transmite progresiv de la un modul la celălalt.

Sursa motoare care acționează șirul de module fotovoltaice poate fi montată *intern* [85], acționând direct pe unul dintre module și fiind dispusă pe structura de susținere a acestuia sau *extern* [87] - în exteriorul șirului, acționând de regulă un element central având un suport propriu.

În continuare, se prezintă câteva soluții practice de sisteme de orientare pentru șiruri de module fotovoltaice. Astfel, compania SunPower Corporation [119] a dezvoltat un sistem de orientare pentru un șir de module fotovoltaice care transmite mișcarea între module cu ajutorul unui

mecanism cu bare articulate (fig. 1.18a). Un alt sistem de orientare dezvoltat de compania SunPower, codificat T0, cu orientare mono-axială (fig. 1.18b), se referă la un șir de module la care transmiterea mișcării se realizează tot prin intermediul unui mecanism cu bare articulate, dar dispunerea este de tip coloană [119].



Figura 1.18. Câmp de șiruri fotovoltaice: a) 17MW tracker T20 SunPower la Alamosa, Colorado; b) 35MW tracker T0 SunPower la DeSoto, Florida [119].

Sistemul de orientare bi-axial din figura 1.20 utilizează cabluri ca modalitate de transmitere a mișcării pentru ambele mișcări (diurnă și sezonieră), acționarea fiind realizată de un singur motor rotativ. Un avantaj important al acestui sistem este folosirea unei singure surse motoare pentru acționarea ambelor mișcări [98].

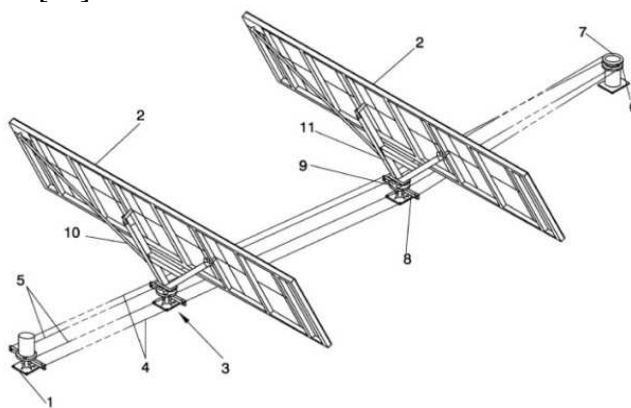


Figura 1.20. Șir de module fotovoltaice cu orientare bi-axială și transmiterea mișcării prin cabluri [98].

Șirul de module din figura 1.23 are o orientare bi-axială și aduce un aport de energie de 60% relativ la sistemul echivalent fix, iar dacă se adaugă o oglindă la baza panoului (pentru a reflecta radiația solară), se poate obține suplimentar cu 10-15% mai multă energie pe an. Sistemul este prevăzut cu o singură sursă motoare pentru acționarea ambelor mișcări. Transmiterea mișcării între module se face printr-o bară de acționare, atât pentru orientarea diurnă, cât și pentru elevație [102].

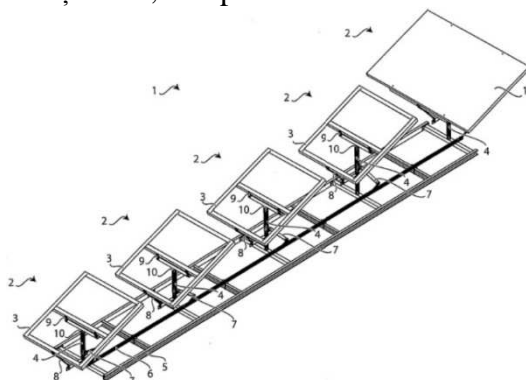


Figura 1.23. Șir de module fotovoltaice cu orientare bi-axială [102].

Brevetul US 2008/0308091 A1 prezintă patru tipuri de sisteme de orientare pentru șiruri de module. În figura 1.24 se prezintă un sistem fotovoltaic cu orientare mono-axială în care modulele sunt înclinate la un unghi fix de elevație și se rotesc în jurul axei orizontale a mișcării diurne. Motorul acționează angrenajul melcat poziționat pe primul suport cu module, care la rândul său angrenează cu un segment de roată dințată (sau cu un lanț) fixată de o țeavă rotundă pe care sunt prinse modulele, țeavă care reprezintă și axa de rotație diurnă. Mișcarea este transmisă simultan către celelalte grupuri de module printr-un ax longitudinal [99].

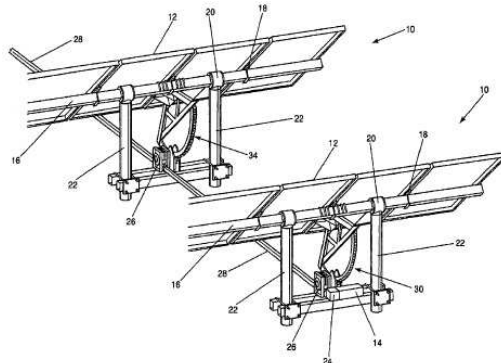


Figura 1.24. Sistem de orientare mono-axial cu axa de rotație diurnă orizontală [99].

În urma analizei sistemelor fotovoltaice și a caracteristicilor acestora, extrase din studiul literaturii de specialitate, se pot enumera următoarele **concluzii majore**:

- sistemele fotovoltaice sunt într-o continuă dezvoltare, gradul de conversie a energiei solare în energie electrică putând fi îmbunătățit chimic - prin tehnologia celulelor solare, sau mecanic - prin utilizarea unor mecanisme de orientare în scopul maximizării aportului de radiație solară incidentă;
- șirurile de module fotovoltaice cu orientare simultană aduc un avantaj important, cel al eficienței energetice și economice crescute (una sau două surse motoare pe sistem);
- orientarea șirurilor de module poate aduce un aport energetic de până la 50% față de sistemele fixe (neorientate);
- aria de cercetare a mecanismelor care transmit mișcarea între modulele dintr-un șir este insuficient explorată în literatura de specialitate.

1.4. OBIECTIVELE TEZEI

Pe baza celor precizate anterior, se formulează **obiectivul general al tezei de doctorat**: *creșterea eficienței energetice și economice a sistemelor de orientare pentru șiruri de module fotovoltaice prin acționarea simultană a modulelor de la o singură sursă motoare, studiul fiind abordat în concept mecatronic.*

Din obiectivul general se pot extrage următoarele **obiective operaționale** (abordate/detaliat în capitolele următoare):

1. stabilirea unui program optim de orientare specific zonei geografice de implementare (v. capitolul 2);
2. proiectarea, modelarea și simularea mecanismului de orientare pentru șirul de module fotovoltaice (v. capitolul 3);
3. modelarea sistemului de control al mecanismului de orientare; verificarea stabilității și robusteții sistemului (v. capitolul 4);
4. dezvoltarea în concept mecatronic a prototipului virtual al sistemului de orientare, prin integrarea modelului mecanic și a sistemului de control, testarea și optimizarea cuplată a celor două componente majore (v. capitolul 5);
5. proiectarea și realizarea prototipului fizic (modelul experimental) pentru un șir de module fotovoltaice cu orientare mono-axială; implementarea și testarea prototipului fizic (v. capitolul 6).

2. MODELAREA RADIAȚIEI SOLARE ȘI A LEGII DE MIȘCARE (ORIENTARE)

2.1. ASPECTE GENERALE PRIVIND RADIAȚIA SOLARĂ

Radiația solară este principalul parametru care influențează eficiența șirurilor de module fotovoltaice. Cantitatea de radiație solară captată poate fi maximizată prin utilizarea de mecanisme de orientare și prin implementarea de strategii optime de orientare a șirului de module fotovoltaice. Radiația solară este influențată de locația geografică avută în vedere, configurația reliefului, sezon, ora din zi, condiții climatologice și nivelul de poluare din acea zonă [49]. Pentru a implementa un șir de module fotovoltaice, se estimează cantitatea de radiație solară, fie utilizând baze de date meteo, fie prin metode empirice (modele matematice), în vederea evaluării câștigului energetic pe care sistemul îl poate aduce. Modelele matematice sunt folosite adesea datorită simplității lor, având ca parametri de intrare caracteristicile zonei, dar au dezavantajul unei aplicabilități limitate, deoarece sunt dezvoltate pe baza înregistrărilor meteo din anumite zone geografice [18, 89].

În prezenta lucrare, pentru a estima radiația solară directă (R) în zona Brașov, s-a folosit modelul empiric Meliss [54], deoarece acest model este apropiat ca și condiții climatice (datele meteo pe care se bazează) de zona Brașov.

2.2. STABILIREA PROGRAMULUI OPTIM DE ORIENTARE

Un sistem fotovoltaic cu mecanism de orientare este proiectat pentru a urmări mișcarea soarelui pe cer. În literatura de specialitate, această traiectorie (sau program de orientare) este determinată prin prognoze, modele matematice, senzori sau combinații.

2.2.1. Determinarea zilelor reprezentative din an

Conform [34], pentru fiecare lună există o zi în care radiația solară este egală cu radiația medie a lunii, această zi fiind cea a cărei declinație este egală cu declinația medie a lunii. În consecință, s-au luat în calcul pentru determinarea programului optim de orientare a șirului de module doar 12 zile reprezentative din an (una pentru fiecare lună).

Pentru anul 2010, s-au determinat cele 12 zile reprezentative cu ajutorul unui program dezvoltat în MATLAB, generându-se fișiere tip “.m” pentru fiecare zi din an. Aceste fișiere permit generarea graficelor curbei radiației solare directe și salvarea acestora ca bază de date, creându-se astfel 365 fișiere tip “.mat” împărțite pe luni.

Pentru a determina energia solară disponibilă pe care un sistem fotovoltaic o poate capta, se integrează curba radiației solare. În continuare, s-au creat în MATLAB/Simulink 12 fișiere corespondente celor 12 luni în care s-au determinat, prin integrarea bazei de date specifice curbei de radiație solară, cantitățile de energie corespunzătoare acelor zile. Astfel, comparându-se cu energia medie a lunii, a rezultat ziua reprezentativă din luna în cauză.

Pentru validare, cele 12 zile rezultate au fost comparate cu zilele obținute prin metoda declinației (ziua reprezentativă a unei luni este ziua în care unghiul de declinație este egal cu unghiul mediu al acelei luni), precum și cu cele determinate în [34]. Considerând $N=1$ pentru 1 Ianuarie, zilele rezultate sunt următoarele: Ianuarie - $N=16$, Februarie - $N=46$, Martie - $N=75$, Aprilie - $N=105$, Mai - $N=135$, Iunie - $N=160$, Iulie - $N=198$, August - $N=229$, Septembrie - $N=259$, Octombrie - $N=289$, Noiembrie - $N=319$ și Decembrie - $N=344$.

2.2.2. Determinarea perechii optime de unghiuri pentru orientare

Eficiența energetică a șirului de module fotovoltaice poate fi maximizată prin creșterea cantității de radiație solară captată, cu un consum minim de energie pentru orientare. Pentru a obține cantitatea maximă de radiație solară receptată, șirul trebuie orientat astfel încât modulele să urmărească continuu poziția soarelui de-a lungul zilei (cazul ideal). Totuși, orientarea continuă presupune câteva dezavantaje: necesitatea realizării unor rapoarte de transmitere foarte mari; timp

mare de operare a sistemului etc. Astfel, o alternativă viabilă (frecvent utilizată) este orientarea în pași (pas cu pas). Orientarea pas cu pas presupune stabilirea domeniului unghiular optim de mișcare, a numărului de pași în care se parcurge domeniul respectiv și a momentului optim de acționare pentru fiecare pas de mișcare.

Perechea de unghiuri care definește poziția șirului de module fotovoltaice (diurn β^* și elevație/sezonier γ^*) este determinată printr-o serie de calcule combinatorice și se află în punctul în care eficiența de orientare este maximă [83]. Eficiența de orientare (η) este raportul procentual dintre energia solară captată pe unitatea de arie (E^*) și energia disponibilă (E), calculate prin integrarea curbelor de radiație solară incidentă (R^*), respectiv directă (R).

Programul de orientare este dezvoltat pentru un sistem de orientare de tip pseudo-ecuatorial, atât în varianta bi-axial, cât și mono-axial, având ca parametru principal eficiența de orientare. Unghiul diurn are domeniul unghiular maxim $[+90^\circ; -90^\circ]$, iar unghiul de elevație ia valori în intervalul $[0^\circ; 90^\circ]$. Pentru a determina programul de orientare optim pe parcursul unui an, se folosesc ca referință zilele determinate anterior cu modelele dezvoltate în MATLAB. Se trasează curbele radiațiilor directă și incidentă pentru toate perechile de unghiuri obținute prin combinarea valorilor de mai sus. Aceste curbe se integrează, rezultând energiile, apoi eficiențele de orientare aferente. S-au proiectat două tipuri de programe de orientare: sezonier – în care unghiul de elevație variază în fiecare lună, și respectiv anual – în care elevația este menținută la o valoare fixă pe parcursul întregului an.

Pentru a determina perechea optimă de unghiuri, s-au considerat următoarele: unghiului diurn al modulului β^* i se atribuie domeniile unghiulare $[+15^\circ; -15^\circ]$, $[+30^\circ; -30^\circ]$, $[+45^\circ; -45^\circ]$, $[+60^\circ; -60^\circ]$, $[+75^\circ; -75^\circ]$, $[+90^\circ; -90^\circ]$ și respectiv valoarea 0° (sistemul fix în poziția de amiază); unghiul de elevație al modulului γ^* ia valorile 0° (sistemul fix în poziția orizontală), 15° , 20° , 22° , 24° , 26° , 28° , 30° , 32° , 34° , 36° , 38° , 40° , 42° , 44° , 46° , 48° , 50° , 52° , 54° , 56° , 58° , 60° , 65° , 70° și 90° .

Strategia de orientare este formulată pe baza următoarelor ipoteze: cer senin, cu factor de turbiditate $T_R = 3$; unghiul diurn al modulului (β^*) variază în pași în domeniile unghiulare menționate, pașii fiind aleși în funcție de unghiul diurn al razei solare β , iar orientarea se face din oră în oră, cu durata pasului de 1 minut; unghiul de elevație al modulului (γ^*) ia o valoare din cele anterior precizate și rămâne fix de-a lungul zilei; se determină energiile disponibile (E) și captată (E^*) prin integrarea curbelor de radiație directă, respectiv incidentă; se calculează eficiența de orientare (η); se centralizează rezultatele, identificându-se eficiența de orientare maximă și astfel unghiurile optime pentru programul de orientare sezonier.

Pentru a determina unghiul de elevație optim anual, se determină energia medie produsă pe fiecare domeniu unghiular al lui β^* din energiile celor 12 zile, cât și energia medie disponibilă rezultată din media energiilor disponibile celor 12 zile. Se calculează eficiența de orientare și se identifică maximumul acesteia, rezultând unghiul de elevație optim pentru programul de orientare anual (fig. 2.7).

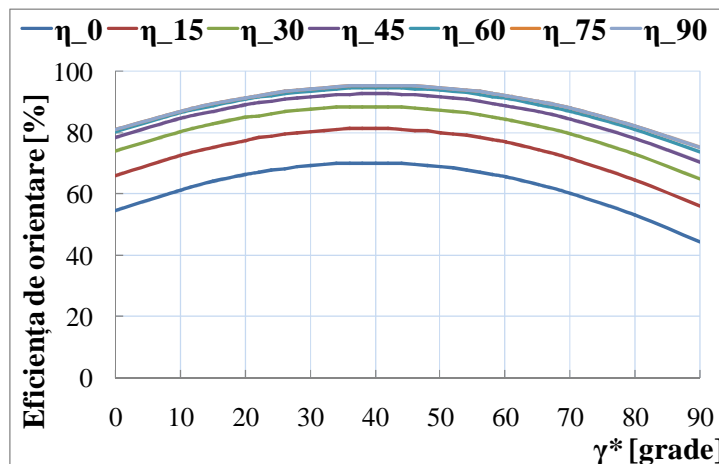


Figura 2.7. Determinarea unghiului de elevație optim pentru programul de orientare anual.

Tabelul 2.2. Valorile optime ale unghiului de elevație γ^* pentru cele două programe de orientare.

Program orientare	Lună (zi)	γ^*	Domeniul unghiului diurn β^*
Sezonier	1 (16)	70°	$\pm 60^\circ, \pm 75^\circ, \pm 90^\circ$ (cele trei coincid ca valori)
	2 (45)	60°	$\pm 75^\circ, \pm 90^\circ$ (cele două coincid ca valori, $\pm 60^\circ$ este la o diferență în minus de 0,02%)
	3 (75)	48°	$\pm 75^\circ$ ($\pm 60^\circ$ este la o diferență în minus de 0,24%, $\pm 90^\circ$ este la o diferență în plus de 0,002%)
	4 (105)	34°	$\pm 90^\circ$ ($\pm 60^\circ$ este la o diferență în minus de 0,86%, $\pm 75^\circ$ este la o diferență în minus de 0,1%)
	5 (135)	22°	$\pm 75^\circ, \pm 90^\circ$ (cele două coincid ca valori, $\pm 60^\circ$ este la o diferență în minus de 1,01%)
	6 (160)	15°	$\pm 75^\circ, \pm 90^\circ$ (cele două coincid ca valori, $\pm 60^\circ$ este la o diferență în minus de 0,98%)
	7 (198)	20°	$\pm 75^\circ, \pm 90^\circ$ (cele două coincid ca valori, $\pm 60^\circ$ este la o diferență în minus de 1%)
	8 (229)	30°	$\pm 90^\circ$ ($\pm 60^\circ$ este la o diferență în minus de 0,91%, $\pm 75^\circ$ este la o diferență în minus de 0,10%)
	9 (259)	44°	$\pm 90^\circ$ ($\pm 60^\circ$ este la o diferență de în minus 0,41%, $\pm 75^\circ$ este la o diferență în minus de 0,02%)
	10 (289)	58°	$\pm 75^\circ, \pm 90^\circ$ (cele două coincid ca valori, $\pm 60^\circ$ este la o diferență în minus de 0,05%)
	11 (319)	65°	$\pm 60^\circ, \pm 75^\circ, \pm 90^\circ$ (cele trei coincid ca valori)
	12 (344)	70°	$\pm 60^\circ, \pm 75^\circ, \pm 90^\circ$ (cele trei coincid ca valori)
Anual		42°	$\pm 90^\circ$ ($\pm 60^\circ$ este la o diferență în minus de 0,78%, $\pm 75^\circ$ este la o diferență în minus de 0,03%)

În aceste condiții, unghiul de elevație γ^* determinat în funcție de eficiența de orientare este prezentat în tabelul 2.2.

Observându-se câștigul foarte mic al domeniului unghiular unde se găsește eficiența maximă de orientare față de următoarele două domenii unghiulare, **se poate concluziona că domeniul optim al unghiului diurn β^* este $[\pm 60^\circ; -60^\circ]$, pentru ambele programe de orientare (sezonier și anual).**

2.2.3. Stabilirea momentului optim de acționare

Odată cu determinarea perechii optime de unghiuri (diurn și elevație) următoarea problemă pentru finalizarea programului de orientare în pași constă din identificarea numărului optim de pași de mișcare/orientare și a momentelor optime de acționare în care trebuie efectuați pașii. Datorită simetriei curbei radiației solare față de amiază se vor alege legile de mișcare cu număr par de pași, plus pasul de întoarcere al sistemului în poziția inițială (apus \rightarrow răsărit). Pentru cursa activă a sistemului (Est \rightarrow Vest) s-au stabilit variante pornind de la 2 pași (60°/pas) și până la 24 pași (5°/pas).

Prin urmare, s-a dezvoltat un algoritm implementat în mediul software MATLAB pentru a genera timpii de acționare corespunzători legilor de mișcare dezvoltate pentru fiecare dintre cele 12 zile reprezentative din an, considerând ambele programe de orientare (sezonier și anual). Etapele algoritmului prin care se determină momentele de sunt:

- domeniul unghiular optim al unghiului diurn este segmentat în poziții intermediare, în funcție de mărimea pasului pentru fiecare din cazurile precizate, de exemplu pentru legea de mișcare în 4 pași ($30^\circ/\text{pas}$) pozițiile sunt $\beta^* = \{60^\circ, 30^\circ, 0^\circ, -30^\circ, -60^\circ\}$;
- se obțin curbele de radiație solară incidentă pentru pozițiile menționate, considerând sistemul fotovoltaic fix în aceste poziții de-a lungul zilei (fig. 2.8); în această figură, $R^*(0)$ reprezintă curba de radiație incidentă pentru sistemul menținut fix în poziția $\beta^*=0^\circ$, $R^*(30)$ - curba pentru sistemul menținut fix în poziția $\beta^*=30^\circ$, ș.a.m.d.;
- analizând curbele de radiație s-a determinat momentul în care valoarea radiației solare incidente pentru o anumită poziție k devine mai mică decât valoarea următoarei poziții $k+1$, acesta fiind momentul în care se efectuează pasul (ex. I, II, III, IV); analiza continuă cu următoarea pereche de poziții $k+1$ și $k+2$ ș.a.m.d.;
- în MATLAB, curbele de radiație solară incidentă sunt considerate ca fiind vectori cu un număr egal de elemente și o discretizare egală, iar pașii se află la intersecția a doi vectori adiacenți, fiind obținuți prin aproximare;
- se trasează graficul care conține punctele de intersecție dintre curbele de radiație incidentă și se generează valorile aproximative ale punctelor de intersecție;
- deoarece valorile obținute au ca subunitate minute decimale - t_d , acestea se transformă în minute standard - t_s .

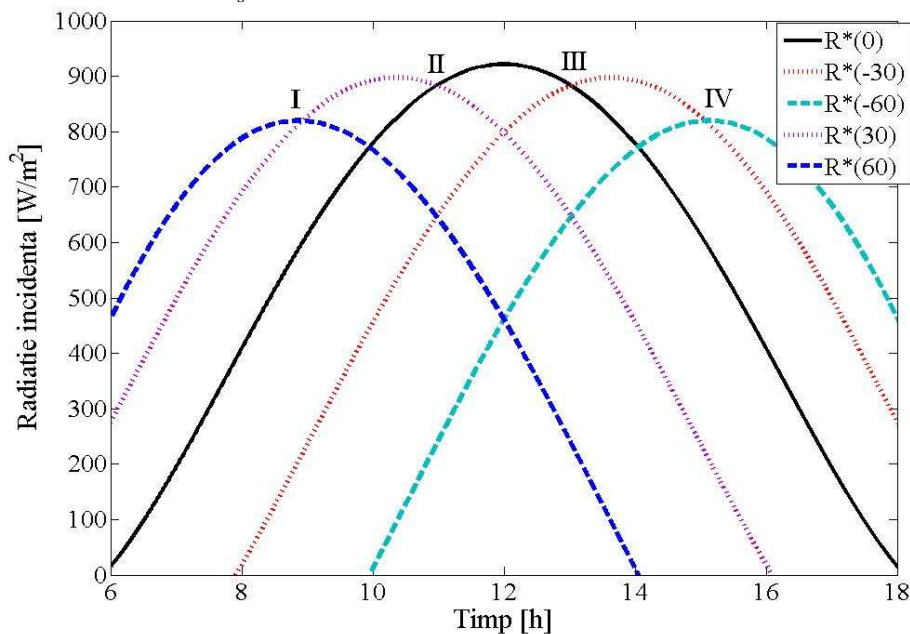


Figura 2.8. Curbele radiațiilor solare incidente pentru proiectarea legii de mișcare în 4 pași ($30^\circ/\text{pas}$), ziua $N=160$, program de orientare anual.

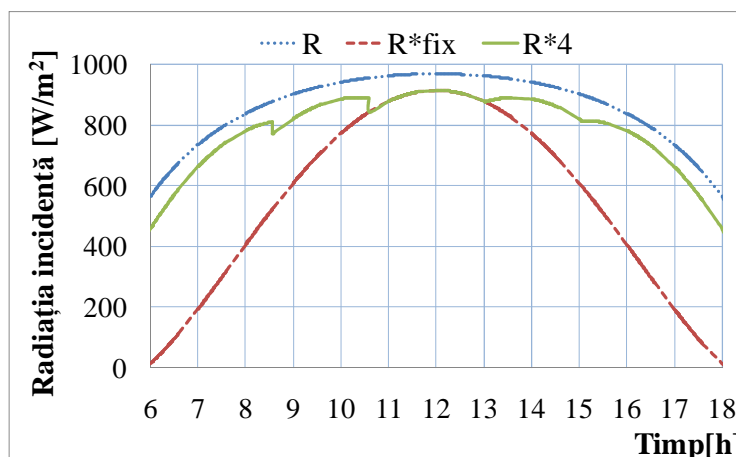


Figura 2.11. Curbele radiațiilor incidente pentru cazurile ideal (continuu), fix, respectiv pas-cu-pas.

În urma determinării momentelor de acționare (ex. I, II, III, IV), s-au trasat graficele legilor de mișcare în pași pentru orientarea diurnă și respectiv graficele comparative pentru cazurile de orientare ideal (continuu), pas-cu-pas și fix (fig. 2.11), observându-se că programul de orientare în pași (curba R*4) are un câștig energetic semnificativ față de sistemul fix - fără orientare (curba R*fix), respectiv se apropie de orientarea continuă - caz ideal (curba R). În cazul orientării continue, unghiul de incidență este în permanență nul, prin urmare radiația solară incidentă R* coincide cu cea directă R.

2.2.4. Orientare bi-axială versus orientare mono-axială

Programul de orientare sezonier poate fi interpretat ca un program de orientare bi-axial, datorită variației unghiului de elevație de-a lungul anului, iar cel anual ca un program mono-axial, datorită valorii fixe a unghiului de elevație. Așadar, în figura 2.12, s-a făcut o comparație între cele două programe, rezultând că programul bi-axial are o eficiență de orientare mai mare cu circa 4% față de programul mono-axial (η_{mediu_s} reprezintă eficiența de orientare medie pe durata programului de orientare sezonier, respectiv η_{mediu_a} reprezintă eficiența de orientare medie pe durata programului de orientare anual). Pe de altă parte, un mecanism de orientare bi-axial implică adăugarea de componente suplimentare (inclusiv sursă motoare) și o lege de control mai complicată, fapt nejustificat în raport cu câștigul adus [83]. **În concluzie, programul de orientare mono-axial este recomandat pentru zona geografică Brașov, în continuare studiul (teoretic și experimental) fiind dezvoltat pentru un șir de module fotovoltaice cu orientare mono-axială.**

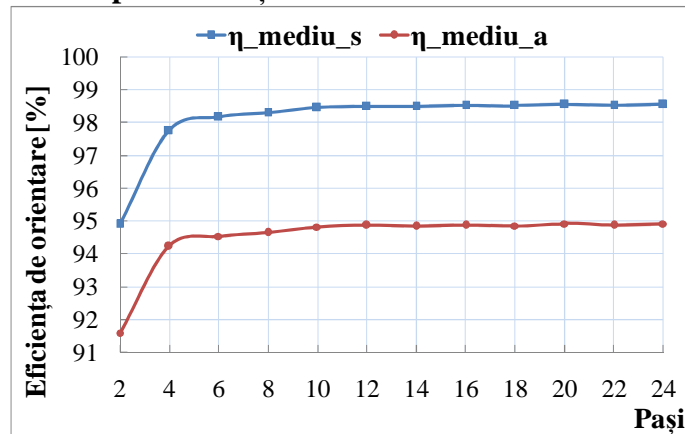


Figura 2.12. Comparație între programele de orientare sezonier (bi-axial) și anual (mono-axial).

De asemenea, tot din figura 2.12 se poate observa că începând cu legea de mișcare în 10 pași, eficiența de orientare nu mai înregistrează o creștere semnificativă, astfel nejustificându-se folosirea unei legi de mișcare cu un număr de pași mai mare de 10 (energia consumată pentru orientare crescând cu fiecare pas).

2.3. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Din cele prezentate anterior se extrag următoarele **concluzii**:

- cele 12 zile reprezentative din an, corespunzătoare cu energia medie a fiecărei luni, determinate cu ajutorul programului dezvoltat în MATLAB (cu două seturi de simulări - cea mai scurtă, respectiv cea mai lungă zi din lună) sunt: 16, 46, 75, 105, 135, 160, 198, 229, 259, 289, 319, 344;
- unghiul de elevație optim pentru programul de orientare anual, în zona geografică Brașov, este $\gamma^*=42^\circ$, în timp ce pentru programul de orientare sezonier, γ^* are valorile $70^\circ, 60^\circ, 48^\circ, 34^\circ, 22^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 44^\circ, 58^\circ, 65^\circ$ și 70° - corespunzătoare lunilor anului;

- domeniul optim al unghiului diurn β^* pentru programul de orientare sezonier este $[+60^\circ; -60^\circ]$, aflat la o diferență de maxim 1% (eficiență de orientare) față de $[+75^\circ; -75^\circ]$ și respectiv $[+90^\circ; -90^\circ]$;
- pentru programul de orientare anual, domeniul optim al unghiului diurn β^* este $[+60^\circ; -60^\circ]$, la o diferență în minus de 0,75% față de $[+75^\circ; -75^\circ]$ și respectiv 0,78% față de $[+90^\circ; -90^\circ]$;
- pentru zona geografică Brașov, nu se justifică utilizarea unui program de orientare bi-axial, datorită eficienței de orientare cu doar 4% mai mare decât cea a unui program de orientare mono-axial.

Principalele *contribuții originale* din acest capitol pot fi sintetizate astfel:

- determinarea celor mai importante zile din an pentru zona geografică Brașov, în funcție de energia medie a lunii;
- determinarea perechii optime de unghiuri pentru două programe de orientare (sezonier și anual), pereche reprezentată de valoarea unghiului de elevație și domeniul unghiular al unghiului diurn;
- determinarea numărului optim de pași de mișcare/orientare și a momentelor optime de acționare a sistemului, pentru cele 12 zile reprezentative din an.

Legile de mișcare/orientare determinate prin algoritmul prezentat urmează să fie utilizate în capitolele următoare ale tezei ca și date de intrare pentru analiza și simularea comportamentului sistemului de orientare.

3. PROIECTAREA, MODELAREA ȘI SIMULAREA MECANISMULUI DE ORIENTARE PENTRU ȘIRUL DE MODULE FOTOVOLTAICE

Sistemul de orientare pentru șirul de module fotovoltaice cuprinde două componente majore: dispozitivul mecanic (mecanismul de orientare) și sistemul de acționare – control. Proiectarea mecanismului de orientare face obiectul prezentului capitol, în timp ce sistemul de control este abordat în capitolul 4 al tezei de doctorat. Ulterior, în capitolul 5, cele două componente majore sunt integrate, în concept mecatronic, la nivelul prototipului virtual al sistemului de orientare.

3.1. DIMENSIONAREA ȘIRULUI DE MODULE DIN PUNCT DE VEDERE AL NECESARULUI DE ENERGIE ELECTRICĂ

Pentru a stabili numărul de module din șirul fotovoltaic, precum și puterea acestora, este necesară dimensionarea șirului având în vedere necesarul energetic pe care trebuie să îl asigure. Șirul de module fotovoltaice a fost dimensionat pentru a alimenta o cabană pe timp de weekend, ciclul de funcționare al sistemului fiind 5 zile încărcare cu 2 zile descărcare.

Pentru calculul puterii instalate s-au considerat anumiți consumatori și durata acestora de funcționare. Prin urmare, s-a ajuns la un consum zilnic estimat de $E_c=804$ Wh/zi, luându-se în considerare inclusiv pierderile din sistem de 20%. Pentru calculul aproximativ al puterii modulelor fotovoltaice [49] se ține cont de randamentul puterii de ieșire (80%) și energia medie zilnică pe plan înclinat în perioada noiembrie-februarie, zona Brașov ($E_{mz}=1,65$ kWh/m²), rezultând un necesar de 3 module cu puterea de 250 W.

3.2. DEFINIREA SOLUȚIEI OPTIME A MECANISMULUI DE ORIENTARE PENTRU ȘIRUL DE MODULE FOTOVOLTAICE

Șirul de module fotovoltaice are ca soluție pentru sistemul de orientare un mecanism mono-axial, având unghiul de înclinare (elevație) fix optim determinat (v. capitolul 2), acționat de un motor rotativ care antrenează la nivelul axului primului modul din șir, cu transmiterea mișcării în serie realizată prin transmisii cu lanț. Mecanismul de orientare optim determinat (fig 3.1) este acționat de un motor electric M, al cărui rotor este conectat/cuplat la un angrenaj melcat 1, care reduce raportul de transmitere (multiplică momentul) și asigură ireversibilitatea mișcării, roata melcată fiind cuplată la axul 2 al primului modul 3 din șir. Transmiterea mișcării diurne (Est - Vest) se efectuează printr-o transmisie cu lanț 4, asigurându-se simultaneitatea mișcării și respectarea valorii unghiului de rotație (în jurul axelor AA') pentru toate modulele din șir.

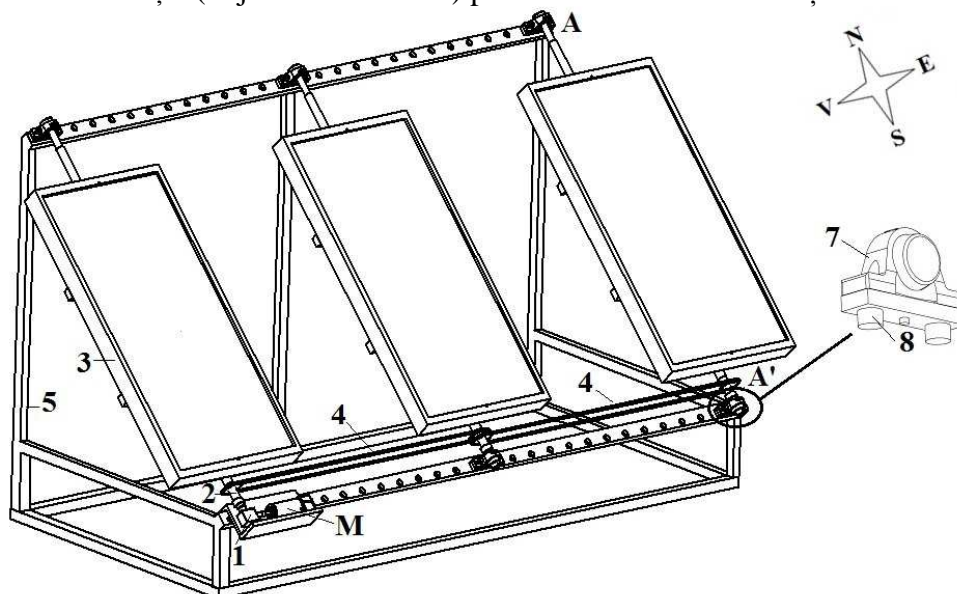


Figura 3.1. Mecanism de orientare a șirului de module fotovoltaice.

Printre avantajele sistemului descris se pot enumera: mecanismul are o complexitate redusă, nu implică costuri ridicate și este ușor de realizat tehnologic; ireversibilitatea mișcării, necesară în pozițiile staționare și la apariția unor perturbații exterioare (ex. vânt), este asigurată de angrenajul melcat, care totodată blochează apariția în sens invers a șocurilor mecanice din sistem; reducerea costului sistemului fotovoltaic prin minimizarea numărului de surse motoare; eliminarea problemei unghiurilor de presiune; permite extinderea prin legarea în serie a mai multe mecanisme etc.

Din soluția optimă prezentată în figura 3.1 se pot obține o serie de soluții derivate, după cum urmează:

- a) șir de module fotovoltaice cu mecanism de orientare mono-axial în care angrenajul melcat este înseriat cu un angrenaj conic; motivația introducerii angrenajului conic constă din reducerea raportului de transmitere al angrenajului melcat, asigurarea unei ungeri mai bune a angrenajului melcat prin montarea pe orizontală a grupului motor – angrenaj melcat, folosirea unui motor cu o putere mai redusă;
- b) șir de module fotovoltaice cu mecanism de orientare bi-axial, unghiul de elevație fiind modificat manual cu reglaj continuu printr-un mecanism șurub-piuliță; la suportul sistemului au fost adăugate ghidaje și culise care permit deplasarea pe orizontală;
- c) șir de module fotovoltaice cu mecanism de orientare bi-axial, unghiul de elevație fiind modificat manual cu reglaj în trepte.

Dintre cele patru soluții prezentate, toate fiind încadrate într-o propunere de brevet [103], se reține ca soluție de bază pentru această lucrare mecanismul din figura 3.1. Prin urmare, în cele ce urmează, studiul teoretico-experimental va fi focalizat pe această soluție.

3.3. PROIECTAREA TRANSMISIILOR DIN CADRUL MECANISMULUI DE ORIENTARE

Proiectarea mecanismului de orientare pentru șirul de module fotovoltaice este precedată de calculul momentelor de încărcare determinate de acțiunea factorilor externi (în cazul de față acțiunea vântului), prin modelarea distribuției presiunii vântului pe suprafața modulului și identificarea tipurilor de încărcare sub acțiunea vântului. Ulterior, momentele generate de acțiunea vântului sunt utilizate ca date de intrare pentru proiectarea transmisiilor din mecanismul de orientare.

3.3.1. Influența factorilor externi

Acțiunea factorilor externi (vânt, ploaie, grindină, zăpadă) și greutatea sistemului supune mecanismul de orientare la deteriorări determinate de suprasolicitări. Dintre factorii externi, cel mai important este vântul, viteza vântului fiind un factor decisiv în determinarea sarcinilor de încărcare a sistemului. Distribuția presiunii vântului pe suprafața modulului poate fi uniformă și neuniformă [21], atât de-a lungul lungimii cât și de-a lungul lățimii modulului.

În funcție de distribuția presiunii vântului, în [21] s-au determinat tipurile de încărcare asupra modulului fotovoltaic, prin punctul de aplicație al forței vântului și greutatea sistemului, după cum urmează: încărcare uniformă cu punctul de aplicație al forței în centrul de greutate al modulului; încărcare neuniformă de-a lungul lungimii modulului; încărcare neuniformă de-a lungul lățimii modulului.

Considerând un modul fotovoltaic cu dimensiunile 2x1m, s-au determinat momentele de încărcare produse de acțiunea vântului. Pentru încărcarea pe lățimea modulului, momentul maxim dat de forța vântului este de 18,11Nm, respectiv 36,22Nm pentru încărcarea pe lungimea modulului.

3.3.2. Proiectarea transmisiilor cu roți dințate și lanț

Mecanismul de orientare propus (v. fig. 3.1) cuprinde două transmisi: reductorul melcat - prin care mișcarea se transmite de la rotorul motorului la axul primului model din șir, respectiv transmisia cu lanț - pentru transmiterea mișcării între module.

Pentru **proiectarea transmisiei prin lanț** s-a folosit un program de calcul elaborat în cadrul departamentului Design de Produs, Mecatronică și Mediu, program bazat pe metoda de calcul prezentată în [44]. Acest program cuprinde trei meniuri: *Date de intrare*, *Calcul* și *Rezultate*. În prima etapă, corespunzătoare meniului *Date de intrare*, se introduc dimensiunile modulului, numărul de module din șir, turația de funcționare, distanța minimă dintre axe, caracterul sarcinii, înclinarea liniei centrelor roților de lanț, modul de întindere al transmisiei prin lanț și modalitatea de ungere. În plus, ca date de intrare sunt folosite și viteza vântului (15 m/s), forța vântului, coeficienții de presiune, brațul forței și momentul generat de acțiunea vântului. Odată introduse datele de intrare, se continuă cu meniul *Calcul*, rezolvându-se ecuațiile pe care este construit programul. În final, prin meniul *Rezultate* sunt afișate rezultatele caracteristice celor două transmisii: pasul lanțului, numărul de dinți și diametrul pinioanelor, numărul de zale ale lanțului ș.a. (fig. 3.10).

Simbol lanț	Pasul p	z1=z2	Dd1=Dd2	Nr.zale W	Dist.axe A	Mtcap	Coef.sig.
	mm		mm		mm		N.mm
			Transmisia	dintre	panourile	1 si 2	
10B	15.875	19	96.449	272	2008.00	55208	41
10B	15.875	21	106.513	274	2008.00	60969	41
	12.7	23	93.268	338	2000.00	39794	52
	12.7	25	101.330	340	2000.00	43233	52
	12.7	27	109.395	342	2000.00	46675	52
	12.7	29	117.463	344	2000.00	50117	52
			Transmisia	dintre	panourile	2 si 3	
	12.7	19	77.159	334	2000.00	32921	52
	12.7	21	85.211	336	2000.00	36356	52
	12.7	23	93.268	338	2000.00	39794	52
	12.7	25	101.330	340	2000.00	43233	52
	9.525	27	82.046	448	2005.00	19477	77
	9.525	29	88.097	450	2005.00	20914	77

Figura 3.10. Rezultatele specifice transmisiiilor prin lanț din mecanismul de orientare a șirului fotovoltaic.

Pentru **proiectarea angrenajului melcat** s-a folosit un program de calcul elaborat de asemenea în cadrul departamentului Design de Produs, Mecatronică și Mediu, program construit pe baza metodicii de calcul din [44]. Acest program cuprinde patru meniuri: *Inputs* (date de intrare), *Pre-dimensioning* (pre-dimensionare), *Dimensioning* (dimensionare) și *Results* (rezultate). Fiecare dintre aceste meniuri reprezintă etape principale și includ sub-etape într-o ordine precis stabilită. Prin urmare, etapa *Inputs* cuprinde: *Tehnicical inputs* (datele tehnice folosite la proiectarea angrenajului) - se definesc momentul la roata melcată, regimul de funcționare, viteza melcului, raportul de transmitere, distanța reală dintre axe și direcția rotației; *Reference rack* (cremaliera de referință) - se definesc parametrii cremalierii; *Number of threads* (numărul de începuturi) - se

indică numărul de începuturi și coeficientul diametral; *Materials* (materiale) - se aleg materialele folosite și tensiunile limită la contact și încovoiere.

În continuare, etapa *Pre-dimensioning* (predimensionare) cuprinde sub-etapele: *Calculus* (calcul) - se afișează distanța calculată și se introduce distanța reală dintre axe; *Results* (rezultate) - se efectuează calculele de predimensionare și se afișează rezultatele corespunzătoare. Etapa *Dimensioning* (dimensionare) include sub-etapele: *Accuracy class* (clasa de acuratețe) - se stabilește clasa de acuratețe; *Stress calculus* (calculul tensiunilor) și *Geometry calculus* (calculul geometriei) - se rezolvă ecuațiile pe baza cărora este construit programul de calcul. În final, etapa *Results* (rezultate) afișează rezultatele specifice proiectării angrenajului melcat: *Geometry* (geometrie) - figura 3.19, *Calculus factors* (factori de calcul) și *Material and stress* (material și tensiuni).

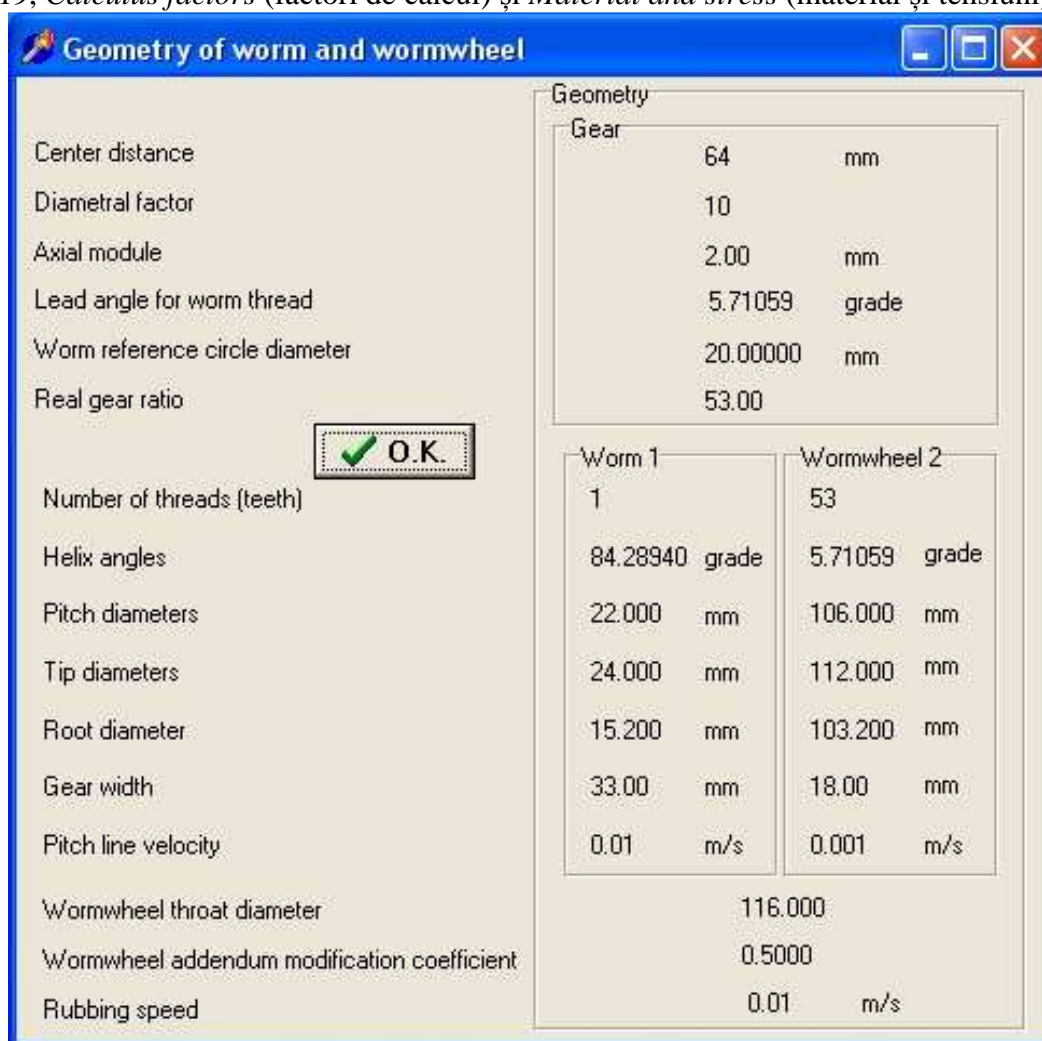


Figura 3.19. Elementele geometrice ale angrenajului melcat.

3.4. MODELAREA ȘI SIMULAREA MECANISMULUI DE ORIENTARE A ȘIRULUI DE MODULE FOTOVOLTAICE

3.4.1. Modelarea CAD a mecanismului de orientare

În vederea întocmirii modelului dinamic al sistemului de orientare pentru șirul de module fotovoltaice (v. pct. 3.4.2), sunt necesare, printre altele, caracteristicile masico-inerțiale (masa, localizarea centrului de masă, momentele și produsele de inerție) ale corpurilor din sistem. Aceste date pot fi stabilite/determinate pe două căi: prin calcul analitic (pe baza relațiilor din mecanica generală), respectiv prin analiza modelelor solide realizate cu ajutorul unui modelor încorporat într-un mediu specializat CAD - Computer Aided Design / Drafting (ex. CATIA, ProENGINEER, SolidWorks, AutoCAD). Pentru prezenta lucrare, modelul solid al mecanismului de orientare pentru

șirul de module fotovoltaice (corespunzător soluției de bază din figura 3.1) a fost realizat prin utilizarea pachetului software licențiat SolidWorks (v. fig. 3.32). Modelul solid astfel obținut a fost în continuare exportat în vederea integrării în modelul MBS (Multi-Body Systems) al sistemului de orientare, realizat prin utilizarea pachetului software ADAMS. Transferul în ADAMS s-a realizat prin utilizarea formatului de fișier Parasolid, operația fiind gestionată prin modulul general de export/import din pachetul ADAMS, concret ADAMS/Exchange.

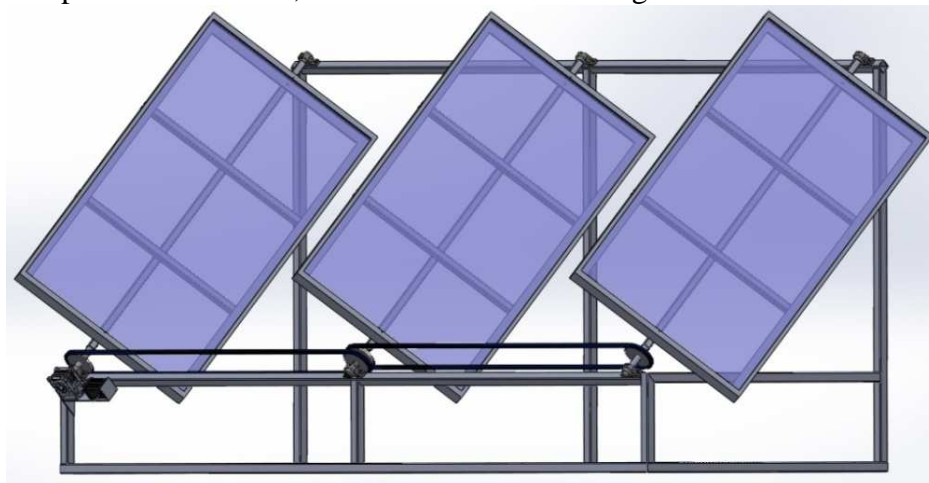


Figura 3.32. Șirul de module fotovoltaice în poziția de răsărit.

3.4.2. Analiza mecanismului de orientare în mediu MBS

Pentru prezenta lucrare, analiza - simularea mecanismului de orientare pentru șirul de module fotovoltaice (mecanism definit/descris în secțiunile anterioare) s-a realizat prin utilizarea pachetului software MBS ADAMS. Pentru parcurgerea etapelor incluse în metoda de analiză s-au utilizat următoarele module: ADAMS/View – preprocesare, ADAMS/Solver – procesare, ADAMS/PostProcessor & Animation – postprocesare [8].

Modelarea ca sistem multicorp a mecanismului de orientare pentru șirul de module fotovoltaice a fost segmentată pe cele două subsisteme de bază: subsistemul de acționare (de la motor la primul modul), respectiv subsistemul de transmitere a mișcării între modulele șirului.

Modelarea ca sistem multicorp a subsistemului de acționare a fost abordată pentru soluția de bază reprezentată în figura 3.1, respectiv pentru varianta derivată prin introducerea angrenajului conic. Pentru **soluția de bază**, modelul MBS (fig. 3.37) conține două corpuri mobile: corpul de intrare (1) – include rotorul motorului și melcul, respectiv corpul de ieșire (2) – include roata melcată (2_a), axul modulului (2_b), roata de lanț (2_c), rama și modulul fotovoltaic (2_d). La acestea se adaugă, evident, corpul fix (0), reprezentat de suportul de susținere. Corpurile de intrare și ieșire sunt conectate la corpul fix prin cuple de rotație (A – 1/0, C – 2/0), respectiv între ele prin cuplă de angrenare (B – 1/2).

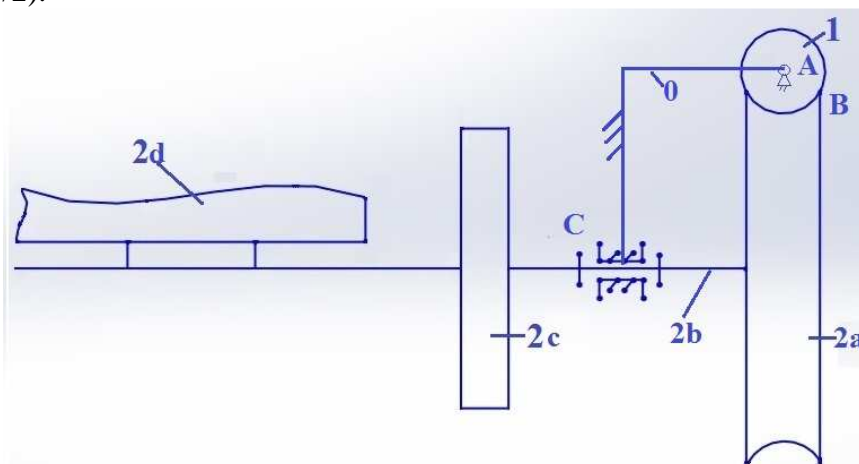


Figura 3.37. Modelul MBS al subsistemului de acționare pentru soluția de bază.

La *varianta derivată*, mișcarea se transmite de la rotorul motorului la axul primului modul prin intermediul unui reductor în două trepte, obținut prin înscrierea reductorului melcat cu un angrenaj conic (având raportul de transmitere 2:1). În cazul general, modelul MBS (fig. 3.38) conține, pe lângă corpul fix (0), trei corpuri mobile: corpul de intrare (1), corpul intermediar (2) – include roata melcată (2a), pinionul conic (2c) și axul comun (2b), respectiv corpul de ieșire (3) – include roata conică condusă (3a), axul (3b), roata de lanț (3c), rama și modulul fotovoltaic (3d). Cele trei corpuri mobile sunt articulate la corpul fix prin cuple de rotație (A – 1/0, C – 2/0, E – 3/0), respectiv între ele prin cuple de angrenare (B – 1/2, D – 2/3).

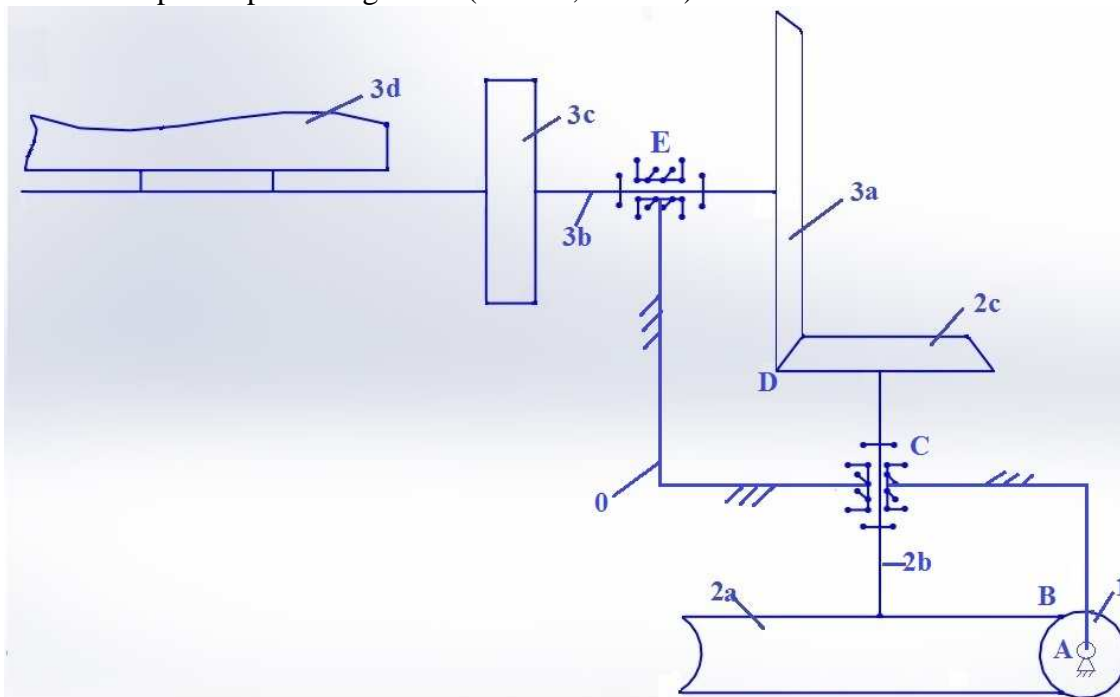


Figura 3.38. Modelul MBS al subsistemului de acționare pentru varianta derivată.

Pentru simplificarea modelului (prin reducerea numărului de corpuri), se poate considera că elementul intermediar se modelează ca și restricție între corpurile de intrare (1) și ieșire (3), concret restricție tip „raport de transmitere” („Coupler” în ADAMS). Cu alte cuvinte, mișcarea se transmite direct de la cupla de rotație a corpului de intrare (A – 1/0) la cupla de rotație a corpului de ieșire (E – 3/0), cu reducerea turației (vitezei unghiulare) corespunzătoare raportului reductorului în două trepte - 100:1 (fig. 3.40).

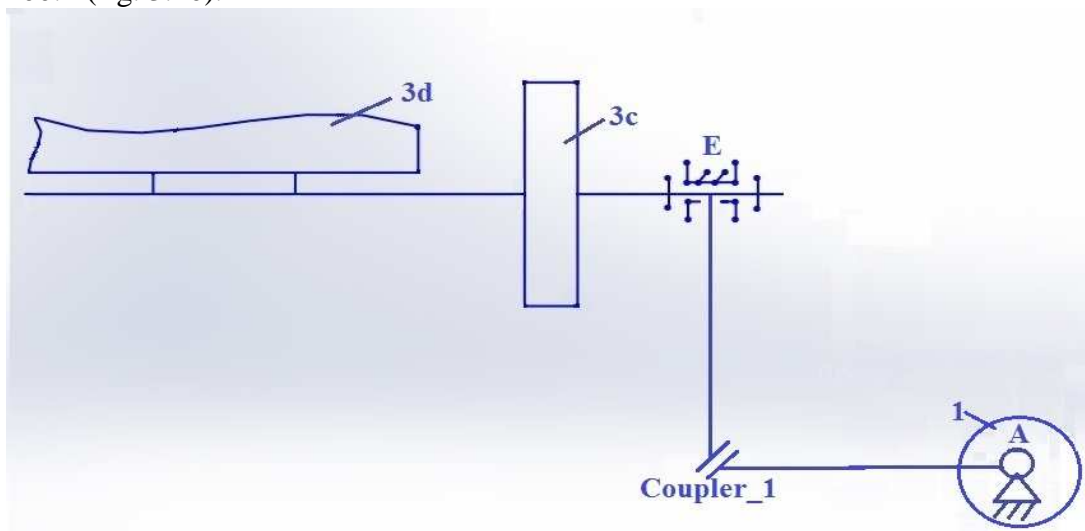


Figura 3.40. Modelul MBS cu număr minim de corpuri al subsistemului de acționare pentru varianta derivată.

Din punct de vedere al *subsistemului de transmitere a mișcării între modulele din șir (transmisia cu lanț)*, se pot dezvolta trei variante de modele MBS, în funcție de nivelul de complexitate (de la număr minim de corpuri, la număr maxim - caz general de modelare):

- varianta “1” - număr minim de corpuri (fig. 3.41): modelul MBS conține corpul fix (0), corpul de intrare (3) – ansamblul primului modul (modul, ramă, ax modul, roată lanț) și corpul de ieșire (4) – ansamblul modulului intermediar, transmisia prin lanț fiind înlocuită cu o restricție tip „raport de transmitere” („Coupler_2”) între cuplele de rotație la bază/suport ($E_1 - 3/0$, $E_2 - 4/0$) ale celor două module (raportul de transmitere fiind 1:1);

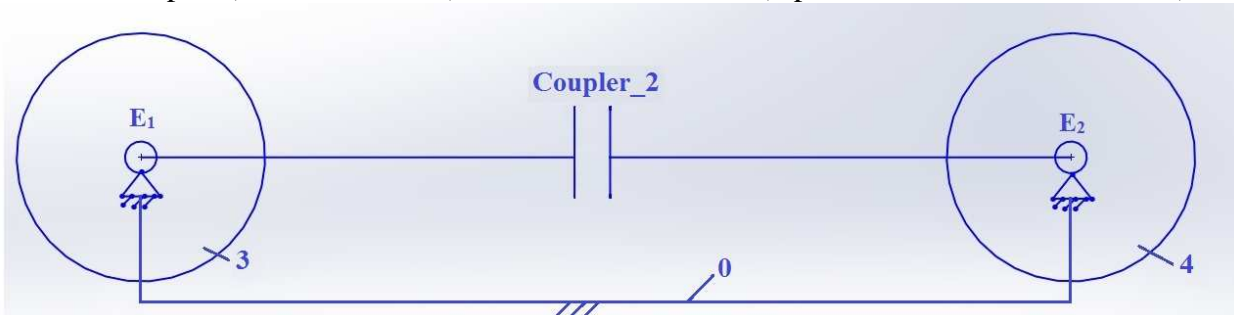


Figura 3.41. Modelul MBS cu număr minim de corpuri al subsistemului de transmitere a mișcării între module.

- varianta “2” – caz general (fig. 3.43): modelul MBS conține, pe lângă corpurile menționate la varianta anterioară, un număr de corpuri intermediare reprezentând zalele lanțului (5, 6, 7, ..., n); legăturile din zale se modelează prin cuple de rotație (F_1, F_2, \dots, F_n), în timp ce legăturile zalelor cu roțile de lanț de pe corpurile de intrare/ieșire (3/4) sunt modelate prin contacte între geometriile adiacente;

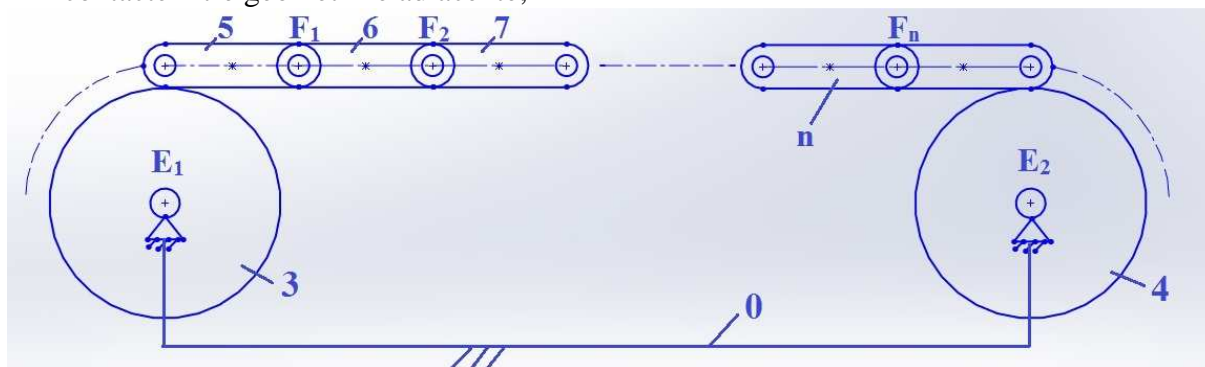


Figura 3.43. Modelul MBS general al subsistemului de transmitere a mișcării între module.

- varianta “3” – caz intermediar (fig. 3.44): comparativ cu varianta anterioară, un număr de zale se modelează ca restricții de distanță constantă ($d=ct$) între puncte de pe zalele alăturate, astfel încât un grup de “3 corpuri/zale” de la varianta anterioară este înlocuit cu un grup de “2 corpuri + 1 restricție de distanță”.

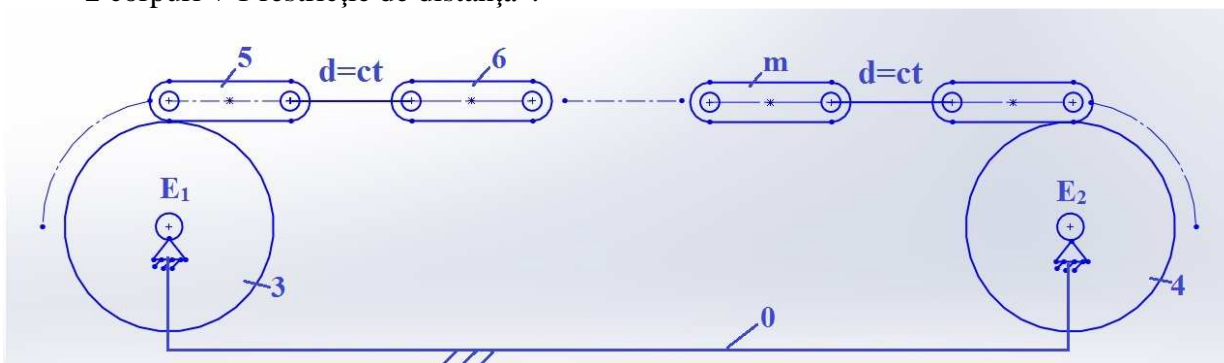


Figura 3.44. Modelul MBS intermediar al subsistemului de transmitere a mișcării între module.

Din punct de vedere al complexității, este de preferat modelul cu număr minim de corpuri. Astfel, pentru soluția de bază a mecanismului de orientare (v. fig. 3.1), modelul MBS cu număr minim de corpuri este cel din figura 3.46, care se obține prin înserierea modelelor din figura 3.37 și respectiv figura 3.41.

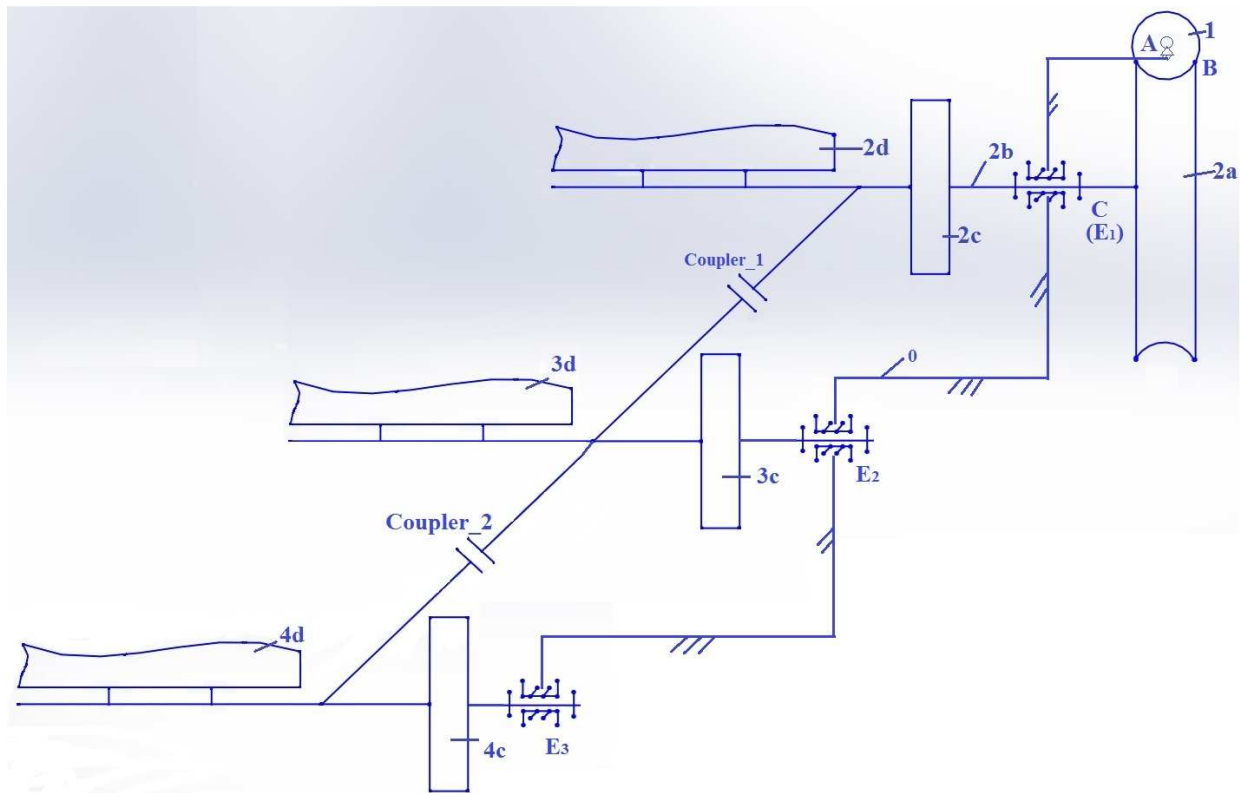


Figura 3.46. Modelul MBS cu număr minim de corpuri al mecanismului de orientare.

Modelul conține corpul fix - suportul (0) și patru corpuri mobile, după cum urmează: corpul de intrare - ansamblul rotor & melc (1), corpurile de ieșire - ansamblurile celor trei module (2, 3, 4), fiecare ansamblu incluzând modulul aferent, rama, axul și roata de lanț (în plus, primul ansamblu/modul conține și roata melcată). Model dispune de un grad de libertate (coordonată generalizată independentă),

$$\text{DOF} = 6n - \Sigma[(r_g - r_r) + r_c] = 24 - [23 + 0] = 1 \quad (3.9)$$

care corespunde rotației corpului de intrare.

În analiza cinematică, această mișcare este controlată (impusă) printr-o restricție cinematică („Motion Generator” în ADAMS) aplicată în cupla de rotație a ansamblului rotor & melc la suportul fix, obținând în acest fel un model cu zero grade de libertate (fără mișcări/coordonate generalizate independente),

$$\text{DOF} = 6n - \Sigma[(r_g - r_r) + r_c] = 24 - [23 + 1] = 0 \quad (3.10)$$

Pentru analiza dinamică, corespunzătoare modelului cu un grad de libertate (rel. 3.9), restricția cinematică este înlocuită cu momentul motor aplicat asupra rotorului. În acest caz, unghiul de poziție al rotorului este coordonată generalizată independentă, momentul motor necesar pentru a genera comportamentul prescris cinematic determinându-se prin analiza dinamică inversă. În continuare, se prezintă rezultatele obținute prin analiza soluției de bază a mecanismului de orientare (v. fig. 3.1), pentru care modelul virtual dezvoltat în ADAMS/View este prezentat în figura 3.48.

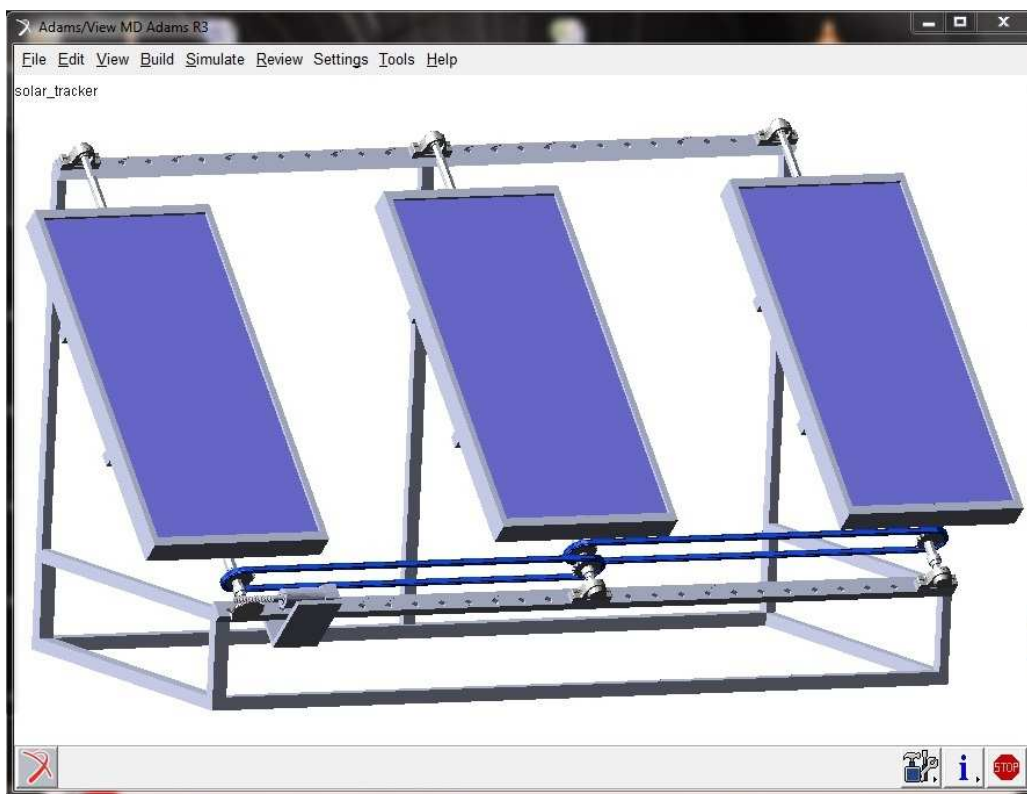


Figura 3.48. Modelul virtual al mecanismului de orientare pentru șirul de module fotovoltaice.

În cazul modelului cinematic, legea de mișcare aplicată prin restricția cinematică în cupla de rotație la bază a rotorului (fig. 3.50) a fost proiectată astfel încât prin raportul de transmitere al reductorului melcat (50:1) să se asigure legea de variație în pași a unghiului diurn (fig. 3.51), măsurat în cupla de rotație la suport a primului modul din șir. Totodată, se prezintă diagramele de variație în timp pentru vitezele unghiulare ale rotorului (fig. 3.52) și modulului (fig. 3.53).

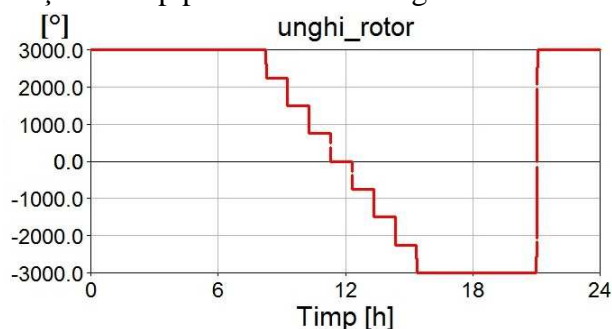


Figura 3.50. Legea de mișcare a rotorului.

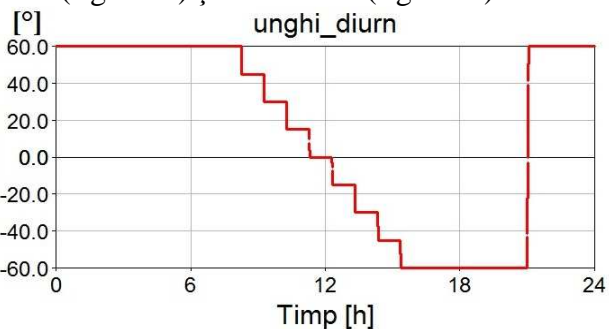


Figura 3.51. Legea de mișcare a modulului.

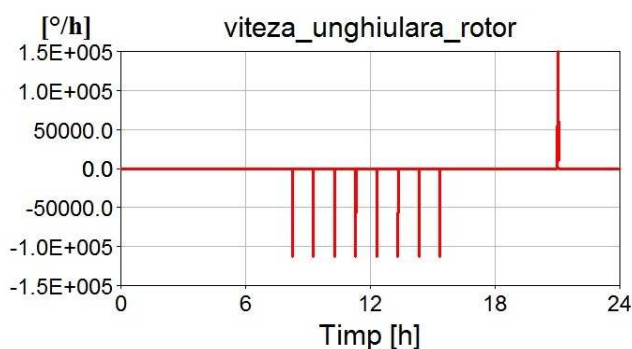


Figura 3.52. Viteza unghiulară a rotorului.

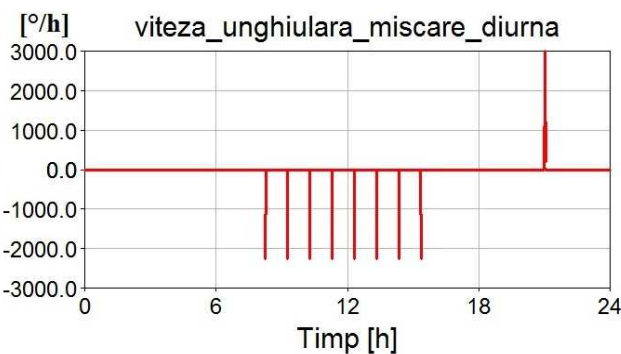


Figura 3.53. Viteza unghiulară a modulului.

Analiza dinamică inversă a fost efectuată considerând încărcarea sistemului doar prin forțele masice și inerțiale, obținându-se diagrama de variație în timp a momentului motor aplicat asupra rotorului (fig. 3.54), necesar pentru a asigura comportamentul prescris cinematic. Se observă că în pozițiile staționare, momentul motor are valoare nulă, sistemul fiind menținut fix în aceste poziții prin intermediul angrenajului melcat (care asigură ireversibilitatea mișcării).

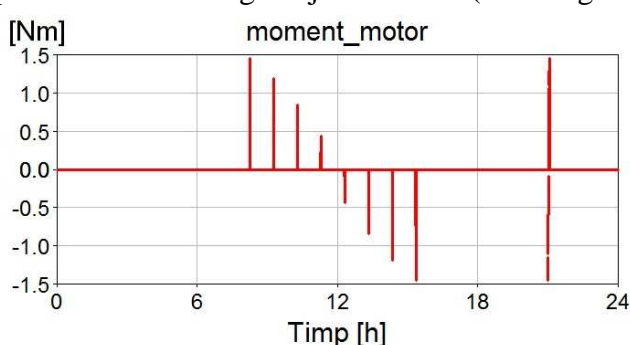


Figura 3.54. Momentul motor.

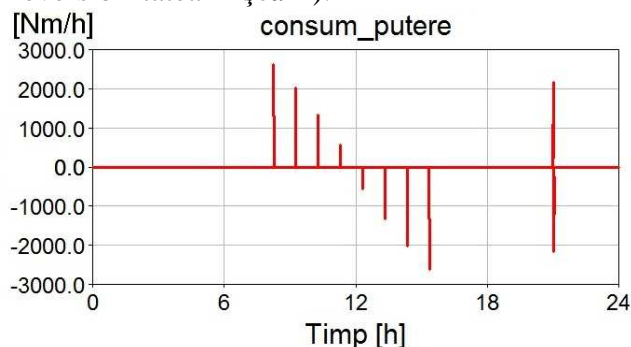


Figura 3.56. Puterea consumată de sistem.

În continuare, în vederea întocmirii modelului dinamic, s-a dezactivat restricția cinematică și s-a modelat un moment exterior aplicat asupra rotorului. Funcția prin care se modelează momentul de antrenare apelează măsura „moment_motor” obținută prin analiza dinamică inversă (v. fig. 3.54), cu alte cuvinte ieșirea din analiza dinamică inversă devine intrare în analiza dinamică. Dintre rezultatele obținute prin analiza dinamică a mecanismului de orientare, în figura 3.56 se prezintă diagrama de variație a puterii consumate pentru realizarea legii de mișcare diurnă (v. fig. 3.51).

În capitolul 5 al tezei de doctorat, modelul dinamic al mecanismului de orientare urmează să fie integrat cu modelul sistemului de control, în vederea obținerii prototipului virtual al sistemului mecatronic de orientare, în conceptul ingineriei concurente. În analiza dinamică care se va efectua asupra prototipului virtual se va lua în considerare o încărcare mai complexă a sistemului, nu doar prin forțele masico-inerțiale, ci și prin forțe externe nestaționare (ex. acțiunea vântului) și respectiv forțe de frecare (ex. în articulațiile modulelor la suport).

3.5. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Din cele prezentate anterior se pot sintetiza următoarele **concluzii**:

- un șir de trei module fotovoltaice acoperă necesarul de energie electrică pentru alimentarea unei cabane, bateriile având un ciclu de funcționare cu 5 zile încărcare și 2 zile descărcare;
- soluția optimă a mecanismului de orientare pentru șirul de module fotovoltaice este: *un mecanism de orientare mono-axial, având unghiul de înclinare (elevație) fix optim determinat, acționat de un motor rotativ poziționat pe axul primului modul, cu transmiterea mișcării în serie între module realizată prin transmisii cu lanț*;
- mecanismul de orientare propus (mono-axial) este de tip modular, permite montarea de module cu dimensiuni diverse și poate fi adaptat pentru orientare bi-axială;
- factorul extern principal este vântul, prin construcția distribuției presiunii vântului pe suprafața modulului și situațiile de încărcare specifice, obținându-se momentele maxime generate de acțiunea vântului, după cum urmează: 18,11 Nm - pentru încărcare pe lățimea modulului, respectiv 36,22 Nm - pentru încărcare pe lungimea modulului;
- modelarea și simularea în mediu virtual precede realizarea - implementarea prototipului fizic, vizând evaluarea comportamentului cinematic și dinamic al mecanismului de orientare (încadrarea în limitele funcționale);
- caracteristicile masico-inerțiale ale corpurilor reprezintă date de intrare pentru conceperea modelului dinamic al mecanismului de orientare, și pot fi determinate (prelevate) din modelul solid (dezvoltat în mediu CAD) al sistemului;

- prin construcție, sistemul propus este bine echilibrat, fapt demonstrat de valorile relativ reduse ale momentului motor (maxim aproximativ 1,5 Nm);
- ca o consecință a concluziei anterioare, puterea necesară pentru orientarea modulelor este redusă, cu efect pozitiv asupra energiei consumate pentru realizarea orientării (și deci asupra eficienței energetice a sistemului).

Principalele **contribuții originale** din acest capitol pot fi sintetizate astfel:

- dimensionarea șirului de module fotovoltaice din punct de vedere al necesarului energetic;
- determinarea soluției optime a sistemului de orientare - *mecanism de orientare mono-axial, având unghiul de înclinare (elevație) fix optim determinat, acționat de un motor rotativ poziționat pe axul primului modul, cu transmiterea mișcării în serie realizată prin transmisii cu lanț*;
- determinarea a trei variante de mecanisme de orientare derivate din soluția de bază: mecanism de orientare mono-axial în care angrenajul melcat este înseriat cu un angrenaj conic, mecanism de orientare bi-axial cu reglarea continuă a unghiului de elevație printr-un mecanism șurub-piuliță, respectiv mecanism de orientare bi-axial cu reglarea manuală în trepte a unghiului de elevație;
- determinarea momentelor de încărcare determinate de acțiunea vântului;
- modelarea solidă a mecanismului de orientare în mediu CAD;
- modelarea ca sistem multicorp a mecanismului de orientare (separat pe subsisteme și în ansamblu);
- conceperea modelelor pentru analiza în mediu virtual (model cinematic, model dinamic invers, model dinamic).

4. MODELAREA SISTEMULUI DE CONTROL AL MECANISMULUI DE ORIENTARE

În cadrul acestui capitol este abordată problema modelării sistemului de control al mecanismului de orientare pentru module fotovoltaice. Abordarea este una graduală, în sensul că se pornește de la o variantă simplă și se crește complexitatea până la nivelul în care se obține un comportament adecvat al sistemului (stabilitate, robustețe).

4.2. FORMULAREA PROBLEMEI DE CONTROL

Studiul vizează determinarea variantei optime de control în circuit deschis, cu alte cuvinte combinația optimă (ca și complexitate, cost și performanță) între schema de control mono/multi-bucă (ca și număr de parametri monitorizați) și tipul de controler. Se pleacă de la premiza de a utiliza o variantă foarte simplă de controler (tip filtru) și de a identifica numărul de bucle de control minim necesare pentru a asigura un comportament adecvat al sistemului (ca și stabilitate, robustețe). În vederea reducerii complexității modelului teoretic s-au adoptat următoarele ipoteze simplificatoare de bază: se consideră un singur modul din șirul fotovoltaic (cu o suprafață activă de 2 m^2 și masa de 20 kg), în speță modulul acționat direct de către sursa motoare (nu se consideră transmisia cu lanț); nu se iau în considerare frecările din cuplele mecanismului. Rezultatul acestui studiu îl constituie modelul "preliminar" al sistemului de control, care ulterior (în capitolul 5) va fi adaptat/dezvoltat/finisat și integrat, în concept mecatronic, în prototipul virtual al mecanismului de orientare pentru șirul de module fotovoltaice, pentru care dispozitivul/modelul mecanic a fost dezvoltat - prezentat în cadrul capitolului 3.

4.3. MODELAREA ȘI SIMULAREA SISTEMULUI DE CONTROL

În acest subcapitol, sistemul de control al mecanismului de orientare pentru un singur modul fotovoltaic este dezvoltat / prezentat succesiv sub forma a trei modele, în funcție de complexitatea fiecăruia. Scopul acestei reprezentări ierarhice este de a identifica modelul optim ca și complexitate și performanță. Modelele sunt dezvoltate și analizate prin utilizarea modulului Simulink din pachetul MATLAB. În principiu, cele trei modele ale sistemului fotovoltaic pot fi descrise după cum urmează: *primul model* este utilizat pentru a determina aportul energetic al unui sistem fotovoltaic mobil (orientat) față de sistemul echivalent fără orientare (fix); *cel de-al doilea model* are ca și componentă suplimentară un sistem de control într-o buclă, cu un singur parametru monitorizat / controlat (unghiul diurn); *cel de-al treilea model* include un sistem de control cu două bucle, respectiv doi parametri monitorizați / controlați (poziție și viteză).

Deși diferite ca și complexitate și componente, cele trei cazuri / modele au în comun, pe lângă ipotezele simplificatoare de bază, următoarele: simularea este realizată pentru ziua reprezentativă a sezonului 6 ($N=160$), considerându-se un cer senin; orientarea se realizează printr-o mișcare continuă – program de orientare anual, unghiul diurn al modulului fiind egal cu unghiul razei solare ($\beta^* = \beta$), în timp ce unghiul de elevație este $\gamma^* = 42^\circ$ - poziție optimă (determinată în capitolul 2); durata simulării corespunde intervalului de timp răsărit - apus: [4:21; 19:81] – timp solar; asupra sistemului nu acționează forțe exterioare.

a) Modelul "1": aportul energetic al unui sistem fotovoltaic mobil față de sistemul echivalent fix

Semnala de intrare pentru sistemul de orientare este dat de legea de mișcare a sistemului, determinată conform celor precizate în capitolul 2. Astfel, notând cu q poziția unghiulară a sistemului (unghiul diurn β^*), viteza \dot{q} este obținută prin derivarea poziției, iar accelerația \ddot{q} prin derivarea vitezei. Pe baza ecuațiilor celor trei parametri, s-a generat în softul MATLAB un fișier de tip ".m" conținând legea de mișcare, iar din acesta s-au generat trei fișiere de tip ".mat", reprezentând bazele de date folosite ca semnale de intrare, și anume unghi, viteză, accelerație.

Cele trei baze de date dezvoltate anterior au fost folosite ca semnale de intrare pentru un *MUX*, semnalul de ieșire fiind sursa pentru actuatorul legat la cupla de rotație a mișcării diurne. La aceeași cuplă s-a legat un senzor care permite măsurarea a diferite mărimi monitorizate cu ajutorul osciloscoapelor virtuale. Puterea dezvoltată de sistem este calculată în cadrul unui subsistem care are ca date de intrare viteza și momentul măsurate la ieșirea din cupla de rotație, iar semnalul de ieșire este energia consumată, acesta fiind semnal de intrare pentru subsistemul în care se calculează câștigul energetic obținut prin orientare de-a lungul unui an.

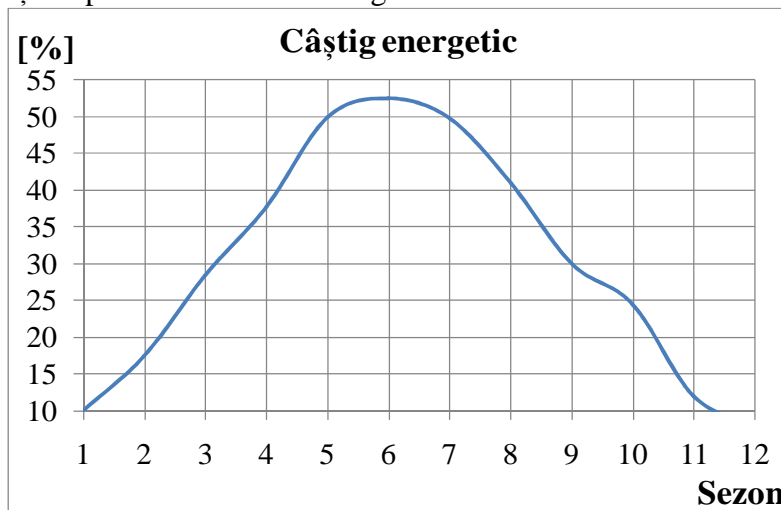


Figura 4.10. Câștigul energetic obținut prin orientare de-a lungul unui an.

Cunoscându-se energia generată de cele două sisteme fotovoltaice (orientat, respectiv fix) și energia consumată pentru realizarea orientării, s-a determinat că orientarea sistemului fotovoltaic aduce un aport de energie de 52,45% relativ la sistemul echivalent fix. Calcule similare au fost efectuate pentru toate sezoanele/zilele reprezentative din an (fig. 4.10), obținându-se un câștig mediu anual de 30,06%. Această valoare justifică utilizarea / utilitatea mecanismului de orientare. Totuși, precizia cu care au fost obținute aceste rezultate nu este foarte bună, lucrându-se cu un model bazat pe multe ipoteze simplificatoare. În aceste condiții, în capitolul 5 se prezintă un calcul de eficiență mai apropiat de realitate, bazat pe prototipul virtual finisat al sistemului de orientare.

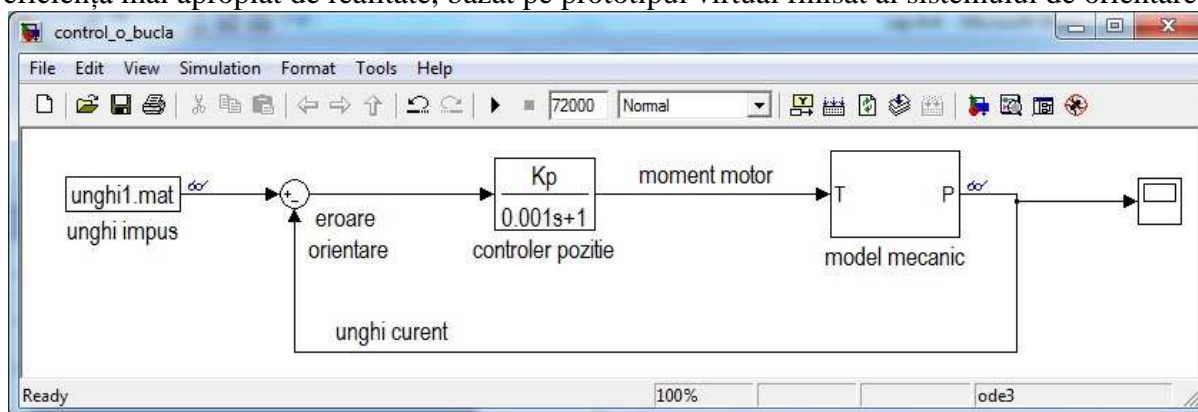


Figura 4.14. Modelul sistemului de control cu o singură buclă.

b) Modelul “2”: sistem fotovoltaic cu sistem de control într-o singură buclă

Următorul pas în rafinarea modelului virtual constă din introducerea sistemului de control mono-contur cu un singur parametru monitorizat (unghiul diurn), iar ca element de control (controler) se utilizează un filtru trecere joasă LPF (Low-Pass Filter). Controlerul a fost integrat/conectat în schema sistemului de control în buclă închisă, semnalul de excitație fiind unul de tip rampă cu panta de 0,00278, corespunzător numărului de grade care se parcurg într-o secundă (conform legii de mișcare). Parametrul controlerului de poziție a fost determinat cu ajutorul blocului *Signal Constraint*, prin impunerea următoarei condiții: semnalul de ieșire trebuie să se încadreze

între două semnale rampă. Progresiv, acest interval de variație al semnalului este restrâns pentru a diminua eroarea staționară, timpul de simulare fiind de 10 secunde, durată suficientă pentru acordarea controlerului.

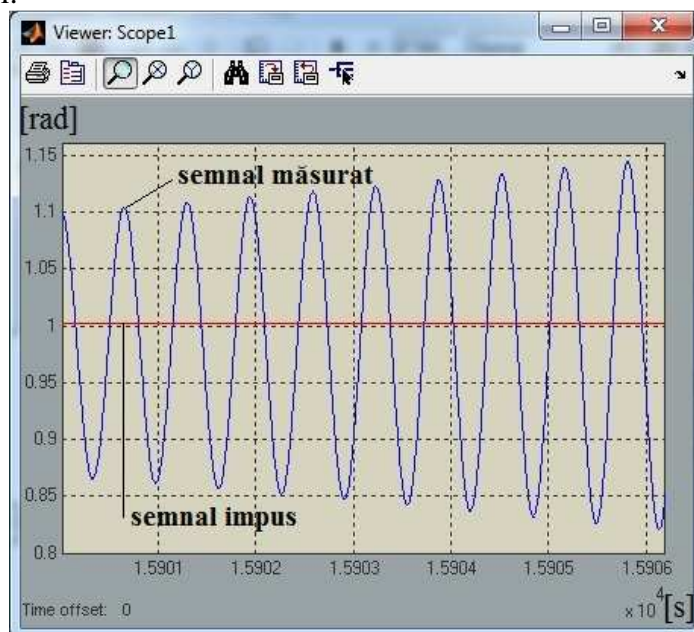


Figura 4.15. Răspunsul sistemului cu un singur parametru controlat.

Pentru validarea/verificarea controlerului s-a realizat modelul din figura 4.14, care integrează o bază de date (*unghi1.mat*) reprezentând poziția diurnă a sistemului. Ieșirea din sistemul de control este reprezentată de unghiul diurn măsurat în cupla de rotație a modului fotovoltaic la cadrul fix. După cum se observă în figura 4.15, **sistemul de orientare nu se poate stabiliza, având o eroare staționară foarte mare**. Așadar, se propune continuarea simulărilor cu un mecanism de orientare cu sistem de control în două bucle (doi parametri monitorizați).

c) Modelul "3": sistem fotovoltaic cu sistem de control în două bucle

Sistemul de control cu două bucle definește o schemă de control în cascadă, ale cărei avantaje au fost prezentate în capitolul 1, de exemplu abilitatea de a aborda mai multe perturbații care influențează procesul și îmbunătățirea performanțelor sistemului [81], [82]. Cei doi parametri care urmează a fi monitorizați sunt poziția sistemului (unghiul diurn) și viteza unghiulară a rotorului (fig. 4.16). Unghiul diurn se măsoară în cupla de rotație a modului fotovoltaic la suport, în timp ce viteza unghiulară este definită în cupla rotorului la stator (fixat pe suport). Procedura de acordare a controlerelor de poziție și viteză (pentru determinarea factorilor de amplificare K_p și K_v) este similară cu cea prezentată la modelul "2" (prin utilizarea blocului *Signal Constraint*).

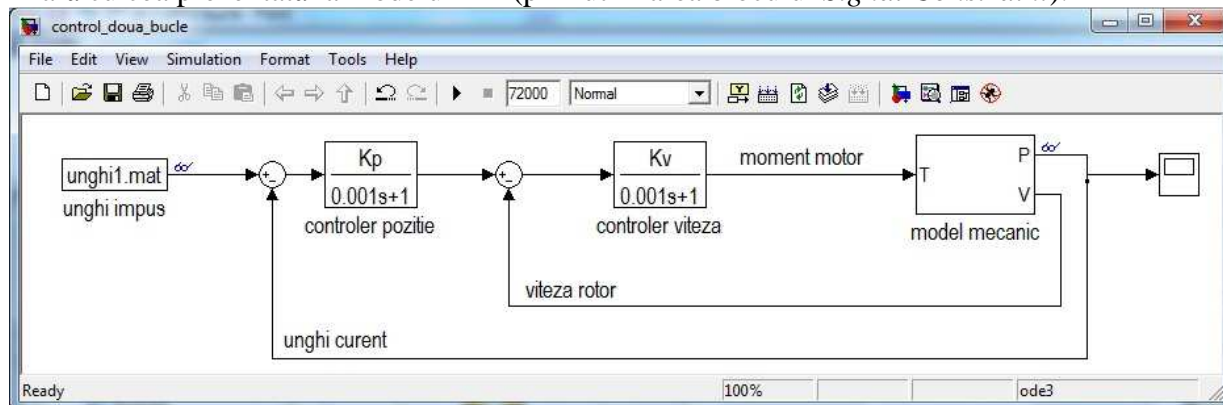


Figura 4.16. Modelul sistemului de control în cascadă cu două bucle.

Simularea mecanismului de orientare cu sistem de control în cascadă cu două bucle a demonstrat faptul că sistemul are un comportament adecvat, indicii de performanță încadrându-se în

domeniile optime/recomandate. De exemplu, în figura 4.18 sunt prezentate diagramele semnalului impus și respectiv măsurat pentru unghiul diurn al sistemului fotovoltaic, pe un interval de timp foarte mic (marcat pe diagrama de variație în timp a unghiului diurn), de aici impresia că semnalul impus este constant, deși în realitate este ușor crescător. Se observă că la pornirea motorului răspunsul indicial are un suprareglaj relativ mare, dar erorile staționare sunt foarte mici, deci pierderile de radiație incidentă (erori de orientare) sunt neglijabile.

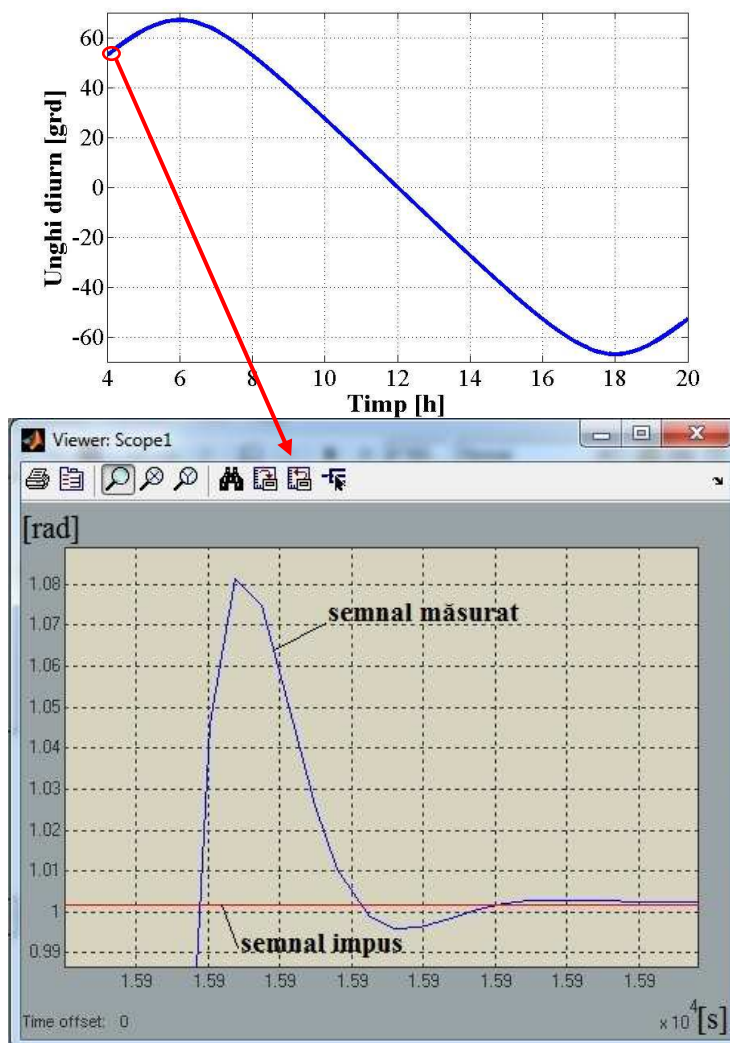


Figura 4.18. Semnalul impus și semnalul măsurat.

În concluzie, pentru mecanismul de orientare adoptat, în condițiile utilizării unui controler simplu tip filtru trecere-joasă (LPF), varianta optimă de control este cea în cascadă cu două bucle, prin care se monitorizează/controlază poziția diurnă a modului fotovoltaic (în bucla exterioară/principală) și respectiv viteza unghiulară a rotorului (în bucla interioară/secundară).

4.4. VERIFICAREA ROBUSTEȚII SISTEMULUI DE CONTROL

Robustețea unui sistem de control reprezintă capacitatea acestuia de a funcționa la indicii de performanță impuși, sau în apropierea acestora, atunci când unul sau mai mulți parametri ai modelului se modifică, respectiv atunci când asupra sistemului acționează perturbații externe. Pentru început se verifică robustețea sistemului de control în cascadă la apariția unei perturbații externe netaționare, reprezentată de acțiunea vântului.

În cadrul modelului sistemului de control în cascadă prezentat în figura 4.16, acțiunea vântului este simulată prin intermediul unui subsistem *Wind*, care este conectat la blocul modelului

mecanic al mecanismului de orientare (acționând direct asupra modului fotovoltaic). Subsistemul *Wind* conține un bloc *Body Actuator* cu trei intrări, momentul generat de vânt fiind modelat / simulat cu ajutorul unui bloc tip *Signal Generator*.

Se consideră o rafală de vânt, care apare după stabilizarea inițială a sistemului (v. fig. 4.18) și acționează ca forță “motoare” (adică momentul generat de forța vântului pe axa de rotație a modului este în același sens cu momentul motor). În acest caz, motorul trebuie să “frâneze” pentru a compensa efectul acțiunii vântului. Semnalul prin care s-a modelat perturbația externă este de tip trapezoidal, cu amplitudinea de 20 Nm și durata de 10 secunde.

Ca rezultat al simulării, în figura 4.21 se prezintă diagrama de variație în timp a erorii de orientare, pentru perioada corespunzătoare acțiunii vântului. Se observă efectul perturbației pe fazele de început, respectiv sfârșit, dar pe zona “de regim” a acțiunii vântului și după încetarea perturbației sistemul se stabilizează corespunzător (erori de orientare neglijabile). Acest rezultat demonstrează robustețea sistemului de control cu două bucle, care este capabil să compenseze efectul perturbațiilor externe nestaționare.

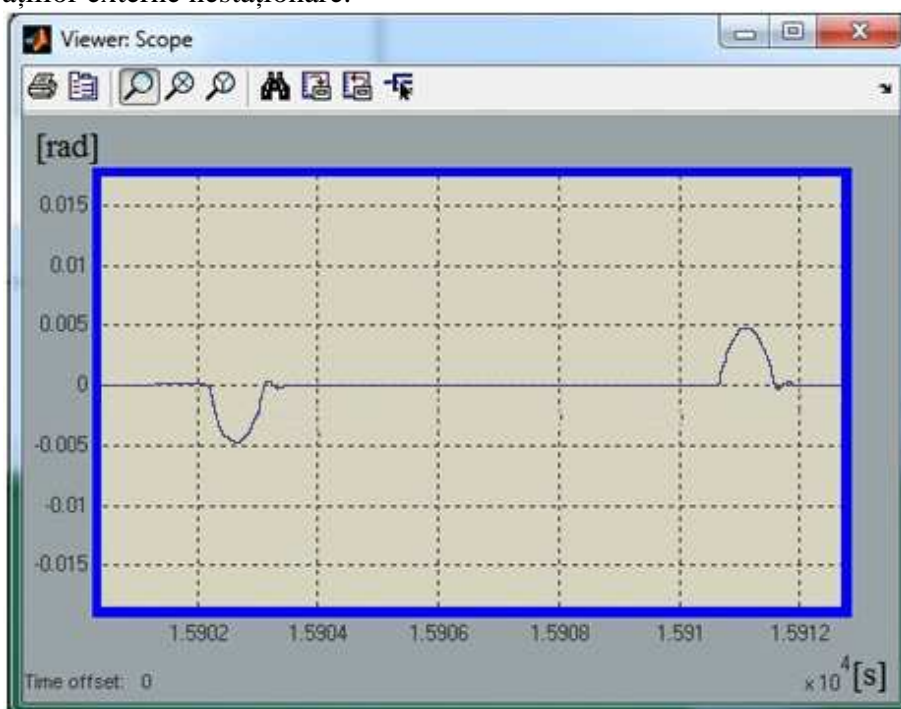


Figura 4.21. Eroarea de orientare datorată acțiunii vântului.

În continuare, se verifică robustețea sistemului de control la modificarea unui parametru al modelului (sistemul fizic), și anume masa modului fotovoltaic. După cum s-a menționat în capitolul 3, unul dintre avantajele sistemului de orientare propus constă din posibilitatea de a monta module de dimensiuni diferite, cu modificări minore ale structurii de susținere. Astfel, simularea inițială s-a efectuat pentru un modul cu masa de 20 kg (v. subcap. 4.2), răspunsul indicial fiind cel prezentat în figura 4.18. Pentru verificarea robusteții, se consideră un modul cu masa de 40 kg (deci, încărcare masică dublă). Simularea se efectuează în condițiile precizate în subcapitolul 4.3 – modelul “3”, comportamentul sistemului (răspunsul indicial) fiind prezentat în figura 4.22. Comparativ cu sistemul inițial, în cazul sistemului cu încărcare masică dublă suprareglajul este ceva mai mare (cu aproximativ 5%), dar sistemul se stabilizează la fel de bine. Astfel, se demonstrează încă o dată robustețea sistemului de control în cascadă cu două bucle, această schemă de control urmând să fie utilizată (în capitolul 5 al tezei) la dezvoltarea – simularea prototipului virtual al mecanismului de orientare pentru șirul de module fotovoltaice.

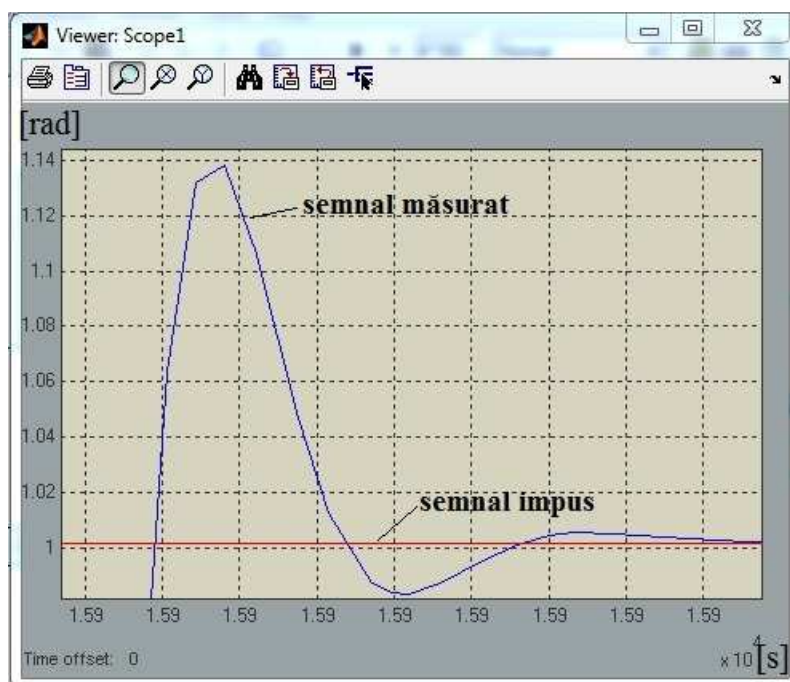


Figura 4.22. Semnalul impus și semnalul măsurat pentru sistemul cu încărcare masică dublă.

4.5. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Din cele prezentate anterior se extrag următoarele **concluzii**:

- orientarea sistemului fotovoltaic aduce un câștig energetic de 30,06% (valoare medie anuală) relativ la sistemul echivalent fix;
- în condițiile utilizării ca dispozitiv de control a unui controler tip filtru trecere-joasă (LPF), sistemul de control cu o singură buclă nu asigură stabilitatea mecanismului de orientare;
- monitorizarea a doi parametri (poziție și viteză) cu controlere LPF asigură stabilitatea mecanismului de orientare, schema de control în cascadă cu două bucle urmând a fi utilizată în capitolul următor pentru simularea prototipului virtual al șirului de module fotovoltaice;
- schema de control în cascadă cu două bucle asigură totodată robustețea sistemului atunci când asupra acestuia acționează factori externi (ex. vânt);
- stabilitatea și robustețea sistemului de control în cascadă se evidențiază și în situația în care se modifică masa ansamblului (de exemplu, prin utilizarea unor module cu dimensiuni mai mari, sau prin antrenarea simultană a mai multor module).

Principalele **contribuții originale** din acest capitol pot fi sintetizate astfel:

- modelarea solidă a mecanismului de orientare în soft CAD (SolidWorks) și transferul – integrarea modelului solid în softul de analiză MATLAB / Simulink;
- stabilirea ipotezelor pentru modelarea preliminară a sistemului de control;
- dezvoltarea și simularea a trei modele pentru sistemul fotovoltaic cu mecanism de orientare: model pentru determinarea câștigului energetic; model pentru sistem fotovoltaic cu schemă de control mono-buclă (monitorizare poziție); model pentru sistem fotovoltaic cu schemă de control în cascadă cu două bucle;
- determinarea schemei de control optime pentru asigurarea stabilității și robusteții: control în cascadă cu două bucle, cu controlere tip LPF, care controlează/monitorizează poziția sistemului (unghiul diurn) și respectiv viteza unghiulară a rotorului;
- determinarea valorii medii anuale a câștigului energetic obținut prin orientarea sistemului fotovoltaic relativ la sistemul echivalent fix.

5. PROTOTIPAREA VIRTUALĂ A SISTEMULUI DE ORIENTARE PENTRU ȘIRUL DE MODULE FOTOVOLTAICE

În prezentul capitol, modelul mecanic al mecanismului de orientare (proiectat și analizat în capitolul 3) și sistemul de control (modelat în capitolul 4) sunt integrate, în concept mecatronic, la nivelul prototipului virtual. De asemenea, se efectuează optimizarea sistemului considerând ca variabile de proiectare factorii de amplificare ai controlerelor și se evaluează eficiența energetică a programelor de orientare (anual & sezonier).

5.2. FINISAREA PROTOTIPULUI VIRTUAL AL MECANISMULUI DE ORIENTARE

Pentru a obține rezultate cât mai apropiate de realitate, prototipul virtual al mecanismului de orientare este finisat prin modelarea frecărilor în cuplele de rotație dintre module și suport. Modelarea frecărilor din cuple este importantă pentru dimensionarea optimă a articulațiilor prin care se efectuează mișcarea diurnă. Totodată, frecările din cuple influențează momentele motoare necesare pentru realizarea legii de mișcare/orientare, regăsindu-se în consumul energetic al sursei motoare (influențează deci bilanțul energetic al sistemului fotovoltaic cu mecanism de orientare).

5.3. MODELAREA SISTEMULUI DE ORIENTARE ÎN CONCEPT MECATRONIC

Simularea sistemului de orientare pentru șirul de module fotovoltaice abordat în teza de doctorat se va face în concept mecatronic, folosind o platformă software de prototipare virtuală. Modelul mecanic al sistemului de orientare a fost realizat cu softul MBS ADAMS (v. capitolul 3), schema de control fiind cea determinată în capitolul 4, și anume control în cascadă cu două bucle cu controlere tip LPF. În capitolul 3 s-a abordat modelarea solidă a mecanismului de orientare și transferul modelului solid din mediul CAD (SolidWorks) în mediul MBS (ADAMS); totodată, s-a realizat modelarea mecanismului de orientare ca sistem multicorp. În continuare, se va prezenta modul în care se realizează transferul de date între mediul MBS (ADAMS) și mediul DFC (MATLAB), pentru realizarea sistemului de control

Prima etapă constă în definirea parametrilor de intrare și ieșire în/din modelul mecanic sub forma unor variabile de stare [9, 10, 79, 85]. Parametrul de intrare în modelul mecanic este momentul motor dezvoltat de sursa motoare, iar funcția acestei variabile de stare este setată pe "0", deoarece momentul motor va primi valori din sistemul de control dezvoltat în MATLAB.

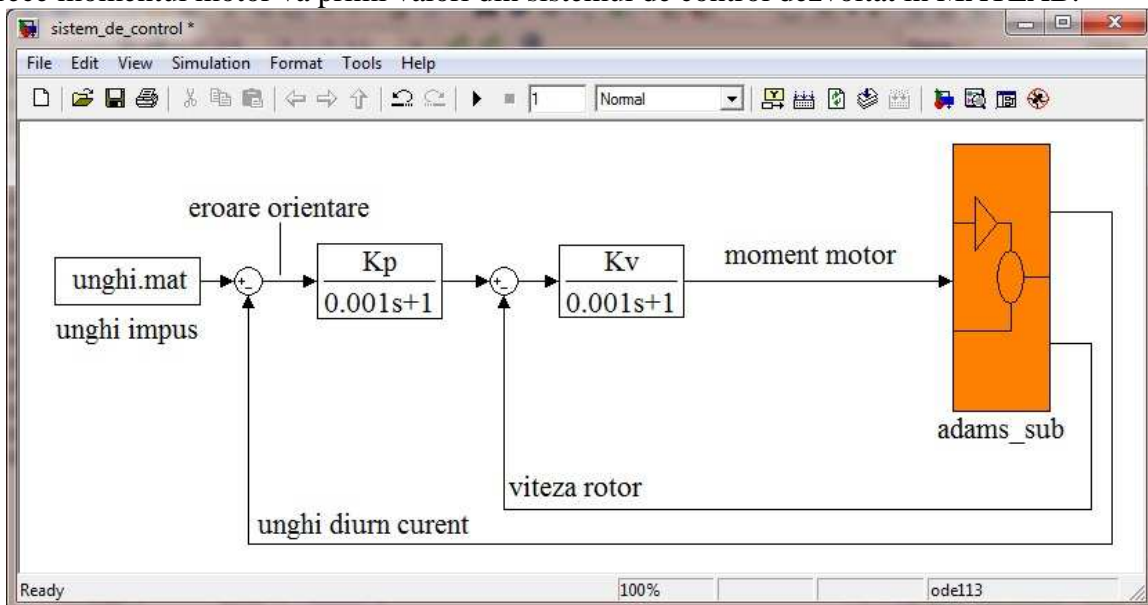


Figura 5.16. Schema de control a sistemului de orientare.

Ieșirile modelului mecanic, transmise către controlerile LPF, sunt reprezentate de unghiul diurn și viteza rotorului. Pentru variabila de stare a ieșirii primare (unghiul diurn), funcția este definită ca fiind unghiul din cupla de rotație dintre modulul fotovoltaic și suportul fix. Pentru variabila de stare a ieșirii secundare (viteză rotor), funcția este definită ca fiind viteza unghiulară în cupla de rotație dintre rotor și stator (suport). În continuare, se construiește în MATLAB/Simulink sistemul de control (fig. 5.16) având datele de intrare pentru semnalul de referință definite în fișierul *unghi.mat*, reprezentând legea de mișcare impusă mecanismului de orientare.

5.4. OPTIMIZAREA SISTEMULUI - SINTEZA ELEMENTELOR DE CONTROL

Acordarea elementelor de control (controlerile de poziție și viteză) este abordată într-un proces de optimizare parametrică, prin utilizarea modulului Insight din pachetul ADAMS. Variabilele de proiectare sunt reprezentate de factorii de amplificare ai celor două controlere (K_p , K_v – v. fig. 5.16), obiectivul optimizării constând din minimizarea erorii de orientare (diferența dintre unghiul diurn impus și unghiul curent/măsurat).

Pentru implementarea algoritmului de optimizare propus este necesar ca modelul dezvoltat în MATLAB/Simulink (v. fig. 5.16) să fie exportat către ADAMS/View. Transferul de date MATLAB → ADAMS se realizează prin generarea unui fișier ESL (External System Library - *.dll), care conține modelul sistemului de control și este importat în ADAMS/View sub forma unei ecuații de stare generală. Modelul parametrizat al sistemului de control, cuplat cu modelul MBS al mecanismului de orientare, devine astfel disponibil pentru optimizare.

Tehnica prin care va fi optimizat sistemul este de tip DOE (Design Of Experiments), aceasta fiind o colecție de proceduri și instrumente statistice pentru planificarea experimentelor și analiza rezultatelor. Pe baza spațiului de proiectare definit prin tehnica DOE, se dezvoltă spațiul de lucru ca o matrice conținând combinații de valori ale variabilelor de proiectare și respectiv valorile corespunzătoare ale funcției obiectiv (obținute prin rulări/analize succesive ale modelului mecatronic al sistemului de orientare). Spațiul de proiectare este o matrice în care se prezintă sub o formă normalizată combinațiile între valorile de interes ale factorilor. Astfel, valoarea “-1” corespunde valorii minime a factorului, iar “1” valorii maxime (conform intervalelor de variație definite). Diverse tipuri de funcții de regresie (liniară, pătratică, cubică) sunt apoi dezvoltate pornind de la matricea spațiului de lucru, optimizarea efectivă bazându-se pe funcția de regresie care aproximează cel mai bine răspunsul sistemului.

ADAMS/Insight oferă indicatori grafici care definesc corectitudinea valorilor obținute prin metodele de evaluare, și anume: roșu - valoarea trebuie investigată, galben - valoarea nu este greșită, dar trebuie avută în vedere, verde - valoarea este adecvată. În măsura în care valorile obținute sunt adecvate (toți indicatorii metodelor sunt pe verde), se poate trece la optimizarea efectivă a sistemului, în cazul de față pentru determinarea valorilor optime ale factorilor de amplificare ai controlerelor, care minimizează eroarea de orientare (mai precis, rădăcina medie pătratică a erorii de orientare pe durata simulării).

Pentru optimizarea sistemului de orientare propus s-au rulat mai multe strategii de investigare, cu scopul de a identifica strategia care oferă valorile adecvate ale indicatorilor grafici corespunzători metodelor de evaluare. În figurile care urmează se folosesc următoarele notații: f_{01} → K_p , f_{02} → K_v , r_{01} → răspunsul sistemului.

1. DOE Screening (2 Level) - Linear - Full Factorial. Strategia permite identificarea factorilor și combinațiilor de factori care influențează semnificativ răspunsul sistemului, fiind o strategie pe două nivele deoarece se utilizează doar valorile minime și maxime ale factorilor (conform intervalelor de variație stabilite). Tehnica Full Factorial folosește toate combinațiile de nivele ale factorilor (nivel → numărul valorilor posibile ale unui factor). Numărul total de rulări / încercări este m^n , m fiind numărul de nivele și n numărul de factori. Analiza rezultatelor obținute prin această strategie conduce la concluzia că există o serie de parametri care nu se încadrează în

limitele acceptabile, fiind necesară finisarea modelului (funcției de regresie), pentru a îndeplini/satisface toate criteriile.

2. DOE Screening (2 Level) - Interactions - Full Factorial. Spre deosebire de modelul liniar anterior, în funcția de regresie generată prin această strategie apare un termen nou ($K_p \cdot K_v$), dat de modelul Interactions, rezultând o funcție de regresie cu 4 coeficienți necunoscuți. Figura 5.28 prezintă spațiul de proiectare, spațiul de lucru și indicatorii grafici specifici acestei strategii, rezultând o funcția de regresie viabilă/utilă (care nu necesită finisare):

$$R_2 = 3,15 - 1,25 \cdot 10^{-3} \cdot K_p - 1,13 \cdot 10^{-3} \cdot K_v + 4,49 \cdot 10^{-7} \cdot K_p \cdot K_v \quad (5.7)$$

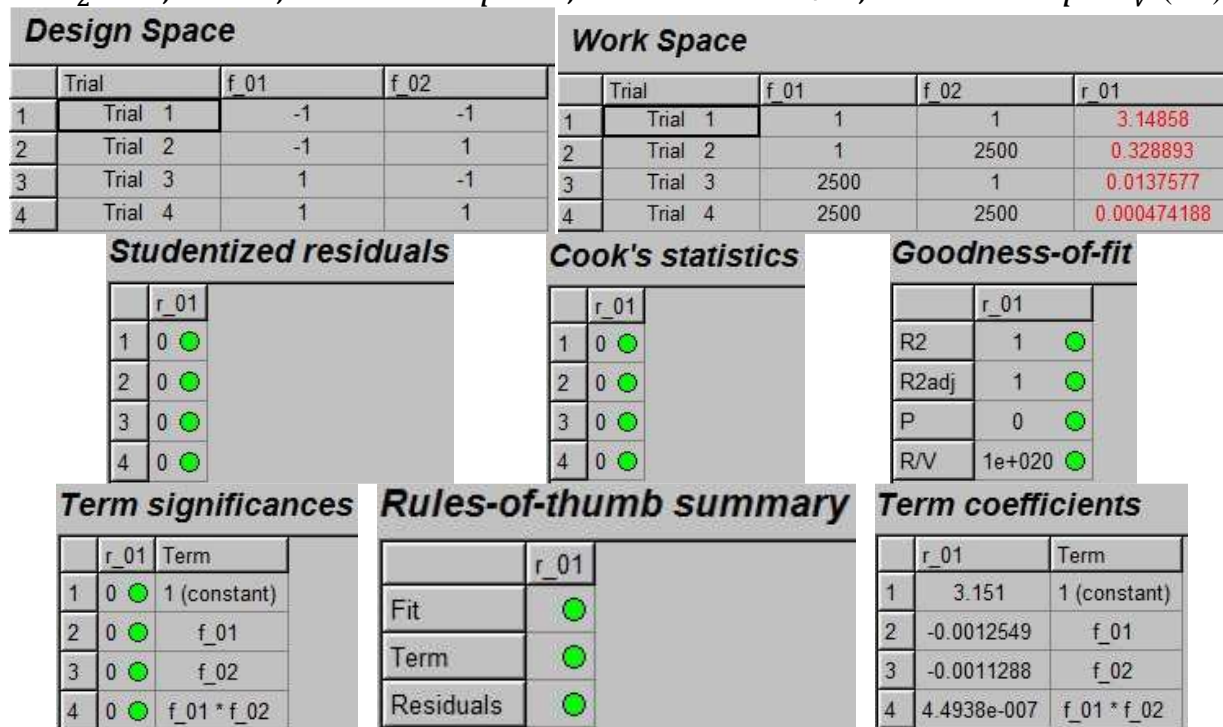


Figura 5.28. Rezultatele caracteristice strategiei DOE Screening (2 Level) - Interactions - Full Factorial.

3. DOE Response Surface - Linear - Latin Hypercube. Strategia de investigare DOE Response Surface definește o suprafață matematică reprezentată printr-o serie de polinoame. Tehnica Latin Hypercube permite definirea unui număr foarte mare de valori pentru fiecare factor. Valorile sunt ordonate aleatoriu, astfel încât fiecare rulare/încercare are o combinație aleatorie de valori ale factorilor. Pentru modelul liniar al acestei strategii, funcția de regresie conține trei coeficienți. Modelul conține o serie de erori, fiind necesară rafinarea/finisarea funcției de regresie.

4. DOE Response Surface - Interactions - D-Optimal. Această strategie produce un model care minimizează incertitudinea coeficienților. Tehnica este caracterizată prin flexibilitate, permițând specificarea numărului total de rulări într-un experiment, suplimentarea cu rulări din alte experimente și indicarea de nivele diferite pentru fiecare factor. Toți parametrii de evaluare ai acestei strategii se încadrează în limite acceptabile (rezultă validitatea modelului).

5. DOE Response Surface - Quadratic - CCF. Tehnica CCF (Central Composite Faced) se utilizează cu modele de răspuns de ordinul 2, generându-se combinații adiționale pentru a estima efectul pătratic: factorii setați la valorile standard, combinațiile cu valorile minime și maxime ale factorilor (Full-Factorial) și respectiv combinațiile în care unul dintre factori are valoarea minimă/maximă iar ceilalți valoarea standard (Screening). Modelul conține erori, fiind necesară rafinarea/finisarea funcției de regresie.

6. DOE Response Surface - Cubic - D-Optimal. Testul este similar cu cel de la strategia "4", dar utilizează un model cubic de funcție de regresie cu 10 coeficienți, care nu necesită finisare, parametrii încadrându-se în limite acceptabile.

În concluzie, trei dintre strategiile prezentate (DOE Screening - Interactions - Full Factorial, DOE Response Surface - Interactions - D-Optimal și DOE Response Surface - Cubic - D-Optimal) sunt viabile și pot fi utilizate pentru optimizarea sistemului de orientare (sinteza optimală a controlerelor de poziție și viteză). În cele ce urmează, **studiul de optimizare va fi efectuat pe baza strategiei DOE Screening - Interactions - Full Factorial**. După cum s-a menționat, obiectivul optimizării constă din minimizarea erorii de orientare (rădăcina medie pătratică pe durata simulării). Algoritmul utilizat pentru optimizare este OptDes - GRG (integrat în ADAMS/Insight).

Fereastra interactivă de optimizare este prezentată în figura 5.33. Operatorul folosit este LsEq, care constrânge răspunsul să fie mai mic, cel mult egal, decât o valoare țintă (în cazul de față, 0,001). Prin rularea operației de optimizare, s-au obținut valorile optime ale factorilor de amplificare, $K_p = 2487$, $K_v = 1866$, pentru care răspunsul sistemului este $RMS = 0,00092565$.

Cu valorile factorilor de amplificare ai controlerelor (K_p și K_v) obținute în etapa de optimizare se revine în ADAMS/View pentru a simula comportamentul sistemului de orientare. Simularea s-a realizat pentru ziua reprezentativă a sezonului 6, $N=160$, program de orientare anual și cu o lege de mișcare în 8 pași (fig. 5.34).

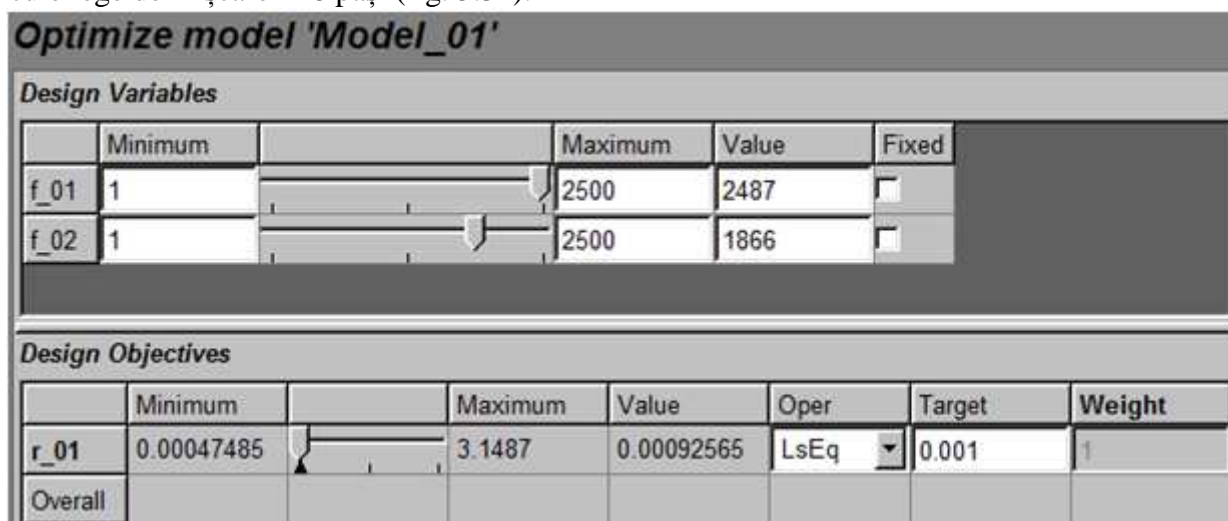


Figura 5.33. Optimizarea răspunsului sistemului.

În urma simulării se poate observa că unghiul diurn măsurat în cupla de rotație a primului modul la suportul fix (fig. 5.35) respectă legea de mișcare impusă, diagrama de variație a erorii de orientare fiind prezentată în figura 5.36. Momentul motor necesar pentru realizarea legii de mișcare are valori reduse (fig. 5.39), datorită echilibrării corespunzătoare a sistemului. Puterea consumată (fig. 5.40) se obține ca produs între momentul motor și viteza unghiulară a rotorului, iar în final, prin integrarea curbei de putere în valoare absolută, rezultă energia consumată pe durata orientării (fig. 5.41), având valoarea $E_c = 90,23$ Wh/zi.

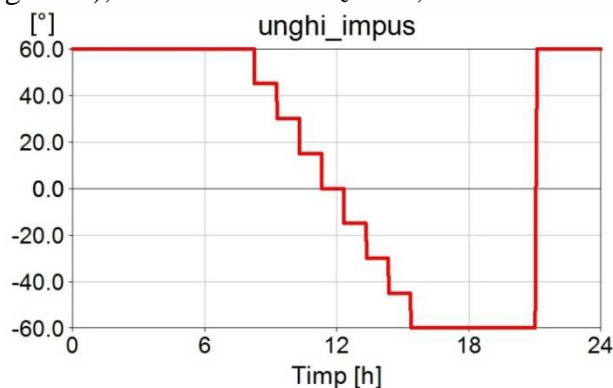


Figura 5.34. Unghiul diurn impus.

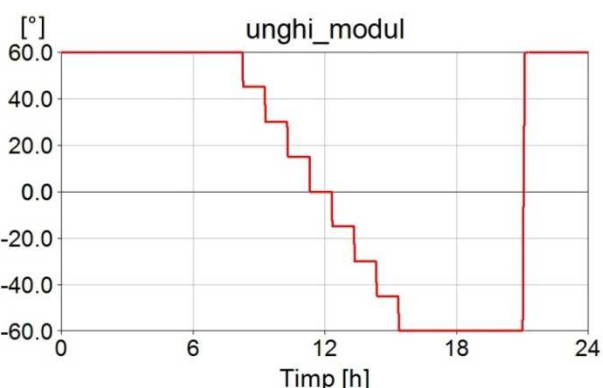


Figura 5.35. Unghiul diurn măsurat.

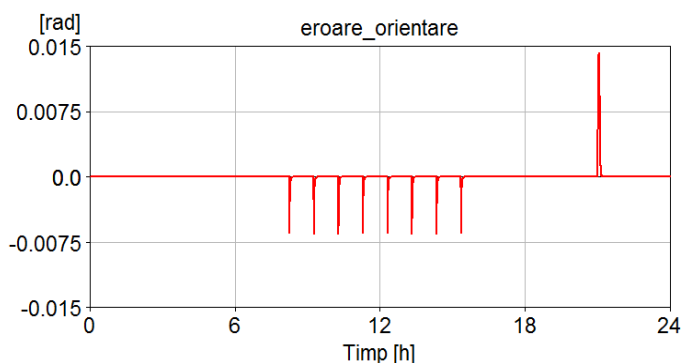


Figura 5.36. Eroarea de orientare.

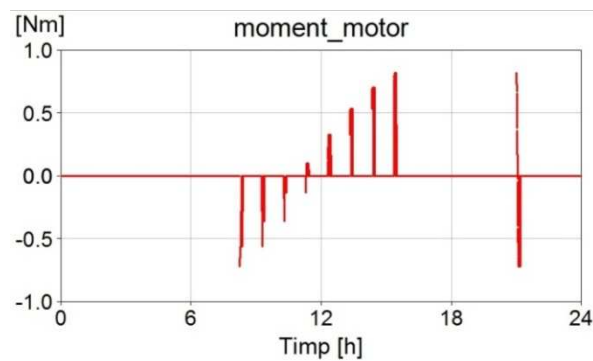


Figura 5.39. Diagrama de variație a momentului motor.

În concluzie, prin optimizarea sistemului de control se minimizează eroarea de orientare, cu efect pozitiv asupra eficienței energetice a sistemului (prin maximizarea aportului de radiație incidentă și minimizarea energiei consumate pentru realizarea legii de mișcare).

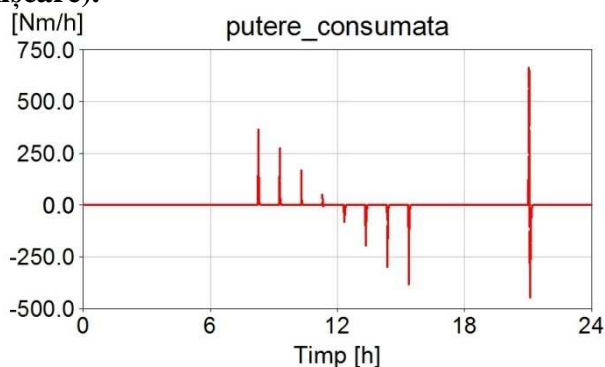


Figura 5.40. Puterea consumată.

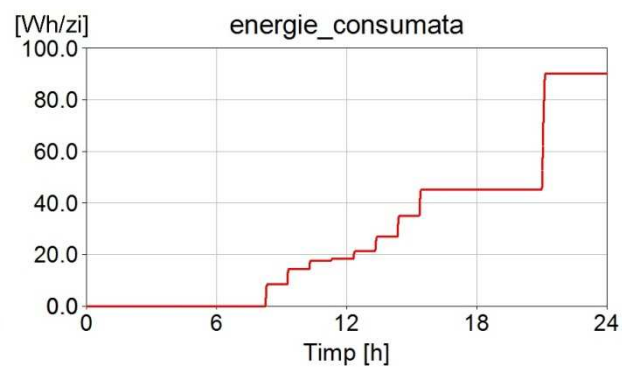


Figura 5.41. Energia consumată pentru orientare.

Pentru a verifica **robustețea sistemului de orientare**, se realizează un test care integrează cele două situații din capitolul 4 (v. subcap 4.4), și anume simularea comportamentului sub acțiunea vântului pentru sistemul cu încărcare masivă dublă. Momentul generat de acțiunea vântului are același profil ca în capitolul 4 (trapezoidal, cu amplitudinea de 20 Nm și durata de 10 secunde), fiind modelat pentru fiecare dintre cele trei module ale șirului. Se consideră că acțiunea vântului se produce în timpul primului pas de mișcare (orientare). Prin simularea prototipului virtual al sistemului de orientare s-a obținut diagrama de variație în timp a erorii de orientare din figura 5.42, valorile reduse demonstrând robustețea sistemului (practic, se confirmă concluzia din capitolul 4, de data aceasta pe un model virtual mult mai apropiat de realitate).

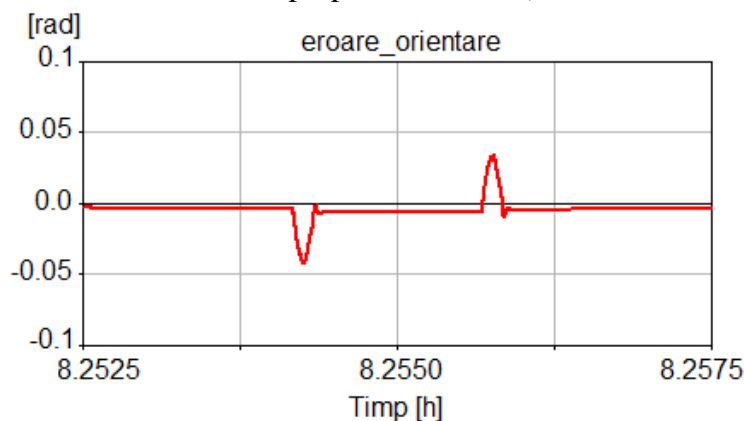


Figura 5.42. Verificarea robusteții sistemului.

5.5. EVALUAREA EFICIENȚEI ENERGETICE A SISTEMULUI DE ORIENTARE

Evaluarea eficienței energetice se realizează considerând prototipul virtual finisat - optimizat al sistemului de orientare. Considerând legile de mișcare obținute în capitolul 2 (cu 8 pași de acționare), pentru programul de orientare sezonier și pentru cel anual, se va determina energia produsă (E_{gT}) și consumul necesar orientării (E_C) pentru cele 12 zile reprezentative din an. Raportarea se face la energia produsă de sistemul echivalent fix (E_{gF}), obținându-se atât eficiența pe sezon, cât și cea medie anuală. Se consideră că modulele fotovoltaice au o suprafață de 2 m^2 și un randament de conversie de 15% fiecare. Energia consumată este aceeași pentru fiecare caz/sezon, întrucât în toate legile de mișcare se utilizează domeniul unghiular $[+60^\circ; -60^\circ]$ și 8 pași de acționare, diferența fiind dată doar de momentele de acționare (efectuare a pașilor), acestea neinfluențând energia consumată de sursa motoare. Se observă că valoarea maximă a eficienței energetice pentru programul sezonier (fig. 5.43) se găsește în sezonul "4", în timp ce pentru programul de orientare anual (fig. 5.44) valoarea maximă corespunde sezonului "6". Eficiența medie anuală a programului de orientare sezonier este de 31,15%, iar pentru cel anual 34,72%.

În concluzie, valorile obținute pentru eficiența energetică demonstrează viabilitatea/utilitatea sistemului de orientare propus

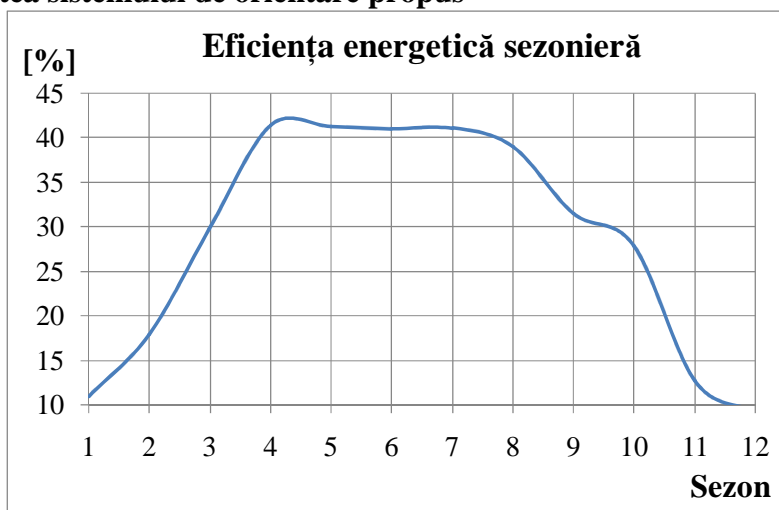


Figura 5.43. Eficiența energetică a programului de orientare sezonier.

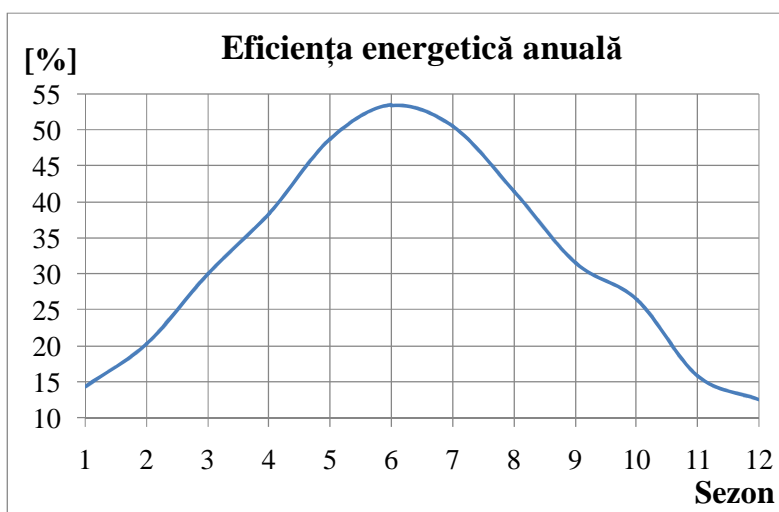


Figura 5.44. Eficiența energetică a programului de orientare anual.

5.6. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Din cele prezentate anterior se extrag următoarele **concluzii**:

- integrarea dispozitivului mecanic și a sistemului de control la nivelul prototipului virtual permite ca cele două componente să fie testate - verificate împreună, minimizându-se astfel riscul ca legea de control să nu fie urmărită (respectată cu acuratețe) de dispozitivul mecanic;
- trei dintre strategiile investigate (DOE Screening - Interactions - Full Factorial, DOE Response Surface - Interactions - D-Optimal și DOE Response Surface - Cubic - D-Optimal) oferă rezultate corespunzătoare, fără a fi necesară finisarea funcției de regresie, prima strategie fiind selectată pentru optimizarea sistemului de orientare;
- prin acordarea corespunzătoare a controlerelor se minimizează erorile de orientare, valorile optime obținute pentru factorii de amplificare ai controlerelor de poziție și viteză fiind $K_p = 2487$ și $K_v = 1866$;
- stabilitatea și robustețea sistemului de orientare se evidențiază atât atunci când asupra sistemului acționează perturbații externe nestaționare (vânt), cât și la modificarea masei sistemului;
- eficiența energetică medie anuală a programului de orientare anual este de 35,23%, iar a celui sezonier de 31,60%.

Principalele **contribuții originale** din acest capitol pot fi sintetizate astfel:

- finisarea prototipului virtual al sistemului prin modelarea frecărilor în cuple;
- definirea modelelor pentru transferul de date MBS (ADAMS) ↔ DFC (MATLAB);
- conceperea schemei de control și modelarea sistemului de orientare în concept mecatronic;
- definirea funcției obiectiv și a variabilelor de proiectare;
- construirea/rularea strategiilor de investigare a sistemului și identificarea strategiei optime;
- optimizarea sistemului de orientare - determinarea valorilor optime ale factorilor de amplificare ai controlerelor;
- determinarea eficienței energetice pentru programele de orientare anual & sezonier și determinarea eficienței medii anuale a fiecărui program.

6. DEZVOLTAREA ȘI TESTAREA MODELULUI EXPERIMENTAL

După cum s-a menționat, sistemul de orientare pentru șirul de module fotovoltaice cuprinde două componente majore: dispozitivul mecanic și sistemul de acționare & control. Modelarea dispozitivului mecanic a făcut obiectul capitolului 3 al tezei de doctorat, în timp ce sistemul de control a fost proiectat în capitolul 4. Integrarea celor două componente s-a realizat în capitolul 5, rezultând prototipul virtual al sistemului de orientare, care a fost utilizat pentru evaluarea și optimizarea comportamentului sistemului (încadrarea în parametrii funcționali). În procesul de dezvoltare a produselor, modelarea și simularea în mediu virtual precede realizarea - implementarea prototipului fizic (modelul experimental), subiect abordat în prezentul capitol.

6.1. DEZVOLTAREA MODELULUI EXPERIMENTAL

Dintre soluțiile prezentate în capitolul 3, s-a reținut ca variantă de bază sistemul din figura 3.1. Mecanismul de orientare este acționat de un motor electric, al cărui rotor este cuplat la un angrenaj melcat, care reduce raportul de transmitere (multiplică momentul) și asigură ireversibilitatea mișcării. Roata melcată este cuplată la axul primului modul din șir, transmiterea mișcării între module realizându-se printr-un mecanism cu lanț. Modulele sunt dispuse pe rame montate (prin rulmenți) pe un suport metalic, care permite poziționarea la unghiul de elevație optim determinat în capitolul 2 (42°). Această soluție a fost utilizată atât în cazul prototipului virtual (v. cap. 5), cât și pentru modelul experimental (prototipul fizic) al sistemului de orientare pentru șirul de module fotovoltaice.

Dezvoltarea modelului experimental a cuprins următoarele etape: modelarea solidă a sistemului - proiectarea de detaliu; elaborarea desenelor de execuție și ansamblu; achiziționarea, respectiv manufacturarea, componentelor; asamblarea componentelor; montarea ansamblului în cadrul platformei de testare a sistemelor fotovoltaice de la Institutul CDI – Produse High Tech pentru Dezvoltare Durabilă PRO-DD (pe acoperișul laboratorului L7 – Sisteme de Energii Regenerabile și Reciclare); montarea echipamentului de acționare și monitorizare.

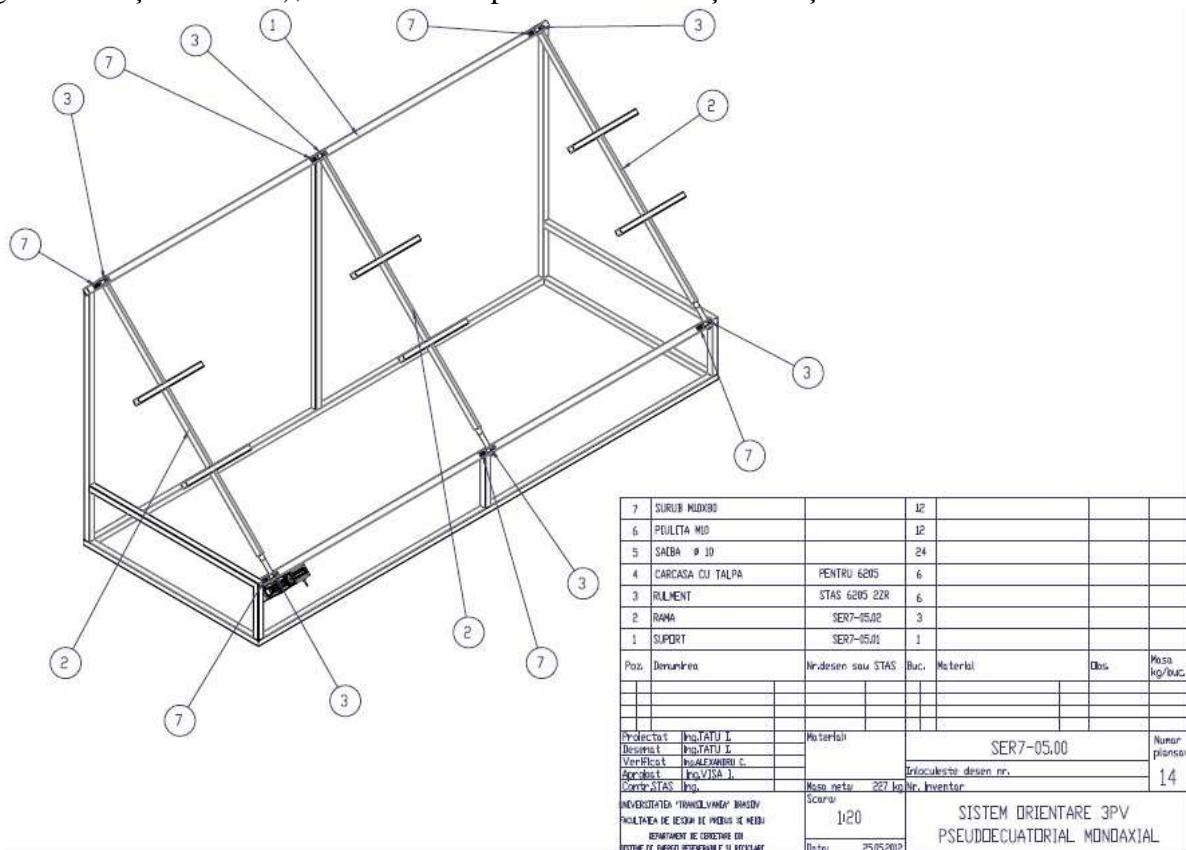


Figura 6.3. Desenul de ansamblu.

Modelarea solidă (3D) a sistemului de orientare a fost abordată în subcapitolul 3.4.1, utilizând mediul de proiectare asistată de calculator SolidWorks. Pentru realizarea modelului solid (v. fig. 3.32) s-au utilizat următoarele date: schema structurală a mecanismului de orientare; caracteristicile tehnice și cotele de gabarit – montaj pentru actuatorul rotativ utilizat ca sursă motoare, reductorul de turație melcat și transmisia prin lanț; datele tehnice, dimensiunile și cotele de montaj ale modulelor fotovoltaice. Pe baza modelului solid, s-au elaborat desenele de execuție și respectiv ansamblu (de exemplu, în figura 6.3 se prezintă desenul de ansamblu al sistemului de orientare).

După cum rezultă și din prezentarea anterioară, modelul experimental al sistemului de orientare pentru șirul de module fotovoltaice cuprinde următoarele componente:

- a) dispozitivul mecanic:** suport (fig. 6.4a); rame module (fig. 6.4b); module fotovoltaice (fig 6.4c); rulmenți 6205 2ZR (fig. 6.4d); lanț 06B1 (fig. 6.4e); roți de lanț (fig. 6.4f.); reductor de turație melcat (fig. 6.4g); cuplaje rigide - rotor/melc, respectiv roată melcată/ax modul; elemente pentru montarea/fixarea unor componente (ex. pentru motor, reductor); elemente de asamblare (ex. șuruburi, piulițe).

Lanțul, roțile de lanț, modulele fotovoltaice, reductorul melcat, rulmenții și elementele de asamblare s-au achiziționat de pe piață, iar suportul, ramele, cuplajele și elementele de montare a reductorului și motorului s-au manufacturat.

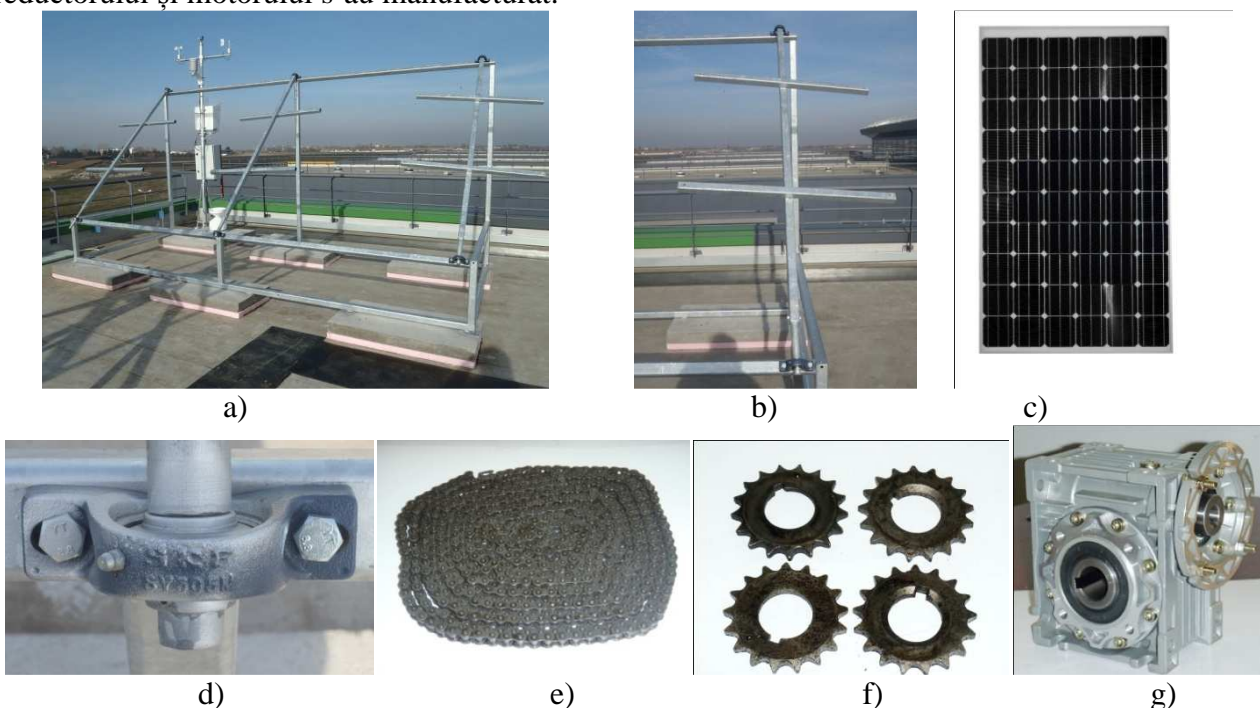


Figura 6.4. Componentele dispozitivului mecanic: suportul sistemului (a), rama modulului (b), modul (c), rulment (d), lanț (e), roți de lanț (f), angrenaj melcat (g).

- b) dispozitivul de acționare și control:** motor pas cu pas (fig. 6.6a); sursă de alimentare (fig. 6.6b); driver CNC 4,2 A (fig. 6.6c); placă de achiziție National Instruments NI 6009 (fig. 6.6d); elemente pentru conectare (ex. cabluri)..

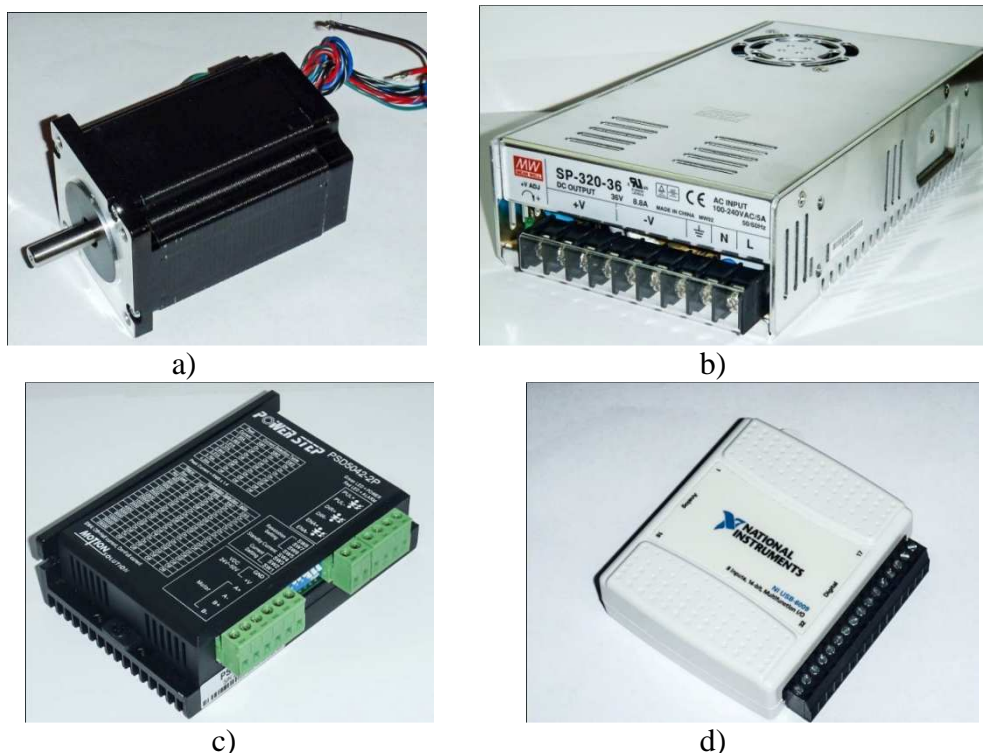


Figura 6.6. Componentele dispozitivului de acționare și control: motor pas-cu-pas (a), sursă de alimentare (b), driver CNC (c), placă de achiziții NI 6009 (d).

6.3. ACHIZIȚIA ȘI PRELUCRAREA DATELOR EXPERIMENTALE

După cum s-a menționat, modelul fizic (experimental) al sistemului de orientare pentru șirul de module fotovoltaice a fost implementat/integrat în cadrul platformei de testare a sistemelor fotovoltaice de la Institutul CDI al Universității Transilvania din Brașov.

Pentru testarea modelului experimental s-au utilizat legile de mișcare (orientare) dezvoltate/proiectate în capitolul 2 al tezei de doctorat corespunzătoare celor 12 sezoane/zile reprezentative din an.

Controlul motorului pas-cu-pas a fost realizat prin intermediul unui program dezvoltat în softul LabView. Legile de mișcare sunt materializate prin baze de date, care depind de timpii de eșantionare a mișcării diurne. Perechea de date poziție unghiulară - timp este transmisă motorului prin intermediul unor mesaje seriale (telegrame), care realizează conducerea/comanda motorului pentru poziționarea pe traiectoria impusă.

În vederea evaluării eficienței energetice a șirului de module fotovoltaice cu mecanism de orientare mono-axială, datele obținute pe modelul experimental anterior descris au fost comparate cu date de referință corespunzătoare unui sistem echivalent fix. Acesta a fost obținut prin menținerea fixă în poziția de amiază (unghi diurn nul) a ultimului modul din șir (practic prin deconectarea mecanică a acestuia de la transmisia cu lanț). În acest fel, a fost posibil ca părțile orientată și fixă din șir să fie testate (din punct de vedere al puterii/energiei produse) în condiții de mediu (climatice) identice (radiația solară, claritatea atmosferei etc.).

Modulele au fost monitorizate individual, achiziționându-se puterea generată pe durata mai multor zile, în condiții climatice diverse (cer senin, cer înnorat, ploaie). Dintre rezultatele astfel obținute (care sunt stocate/înregistrate zilnic într-o bază de date pe calculator), în figura 6.8 se prezintă curbele de putere pentru un modul orientat conform legii de mișcare determinate în cap. 2 și respectiv modulul menținut fix. Înregistrările corespund zilei de 18 noiembrie (N = 322), pentru care legea de orientare impusă (afărentă sezonului "11", program de orientare anual - v. cap. 2) este prezentată în figura 6.9

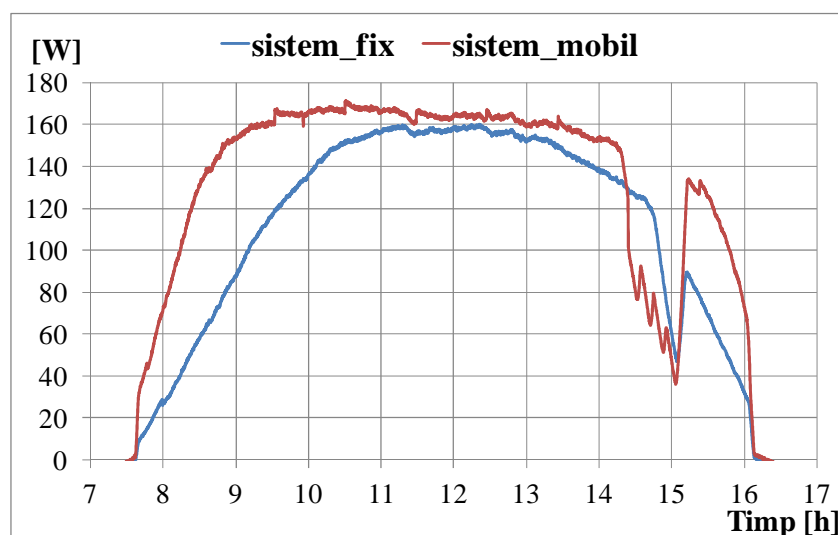


Figura 6.8. Puterea generată de un modul din sistemul mobil și respectiv fix (N=322).

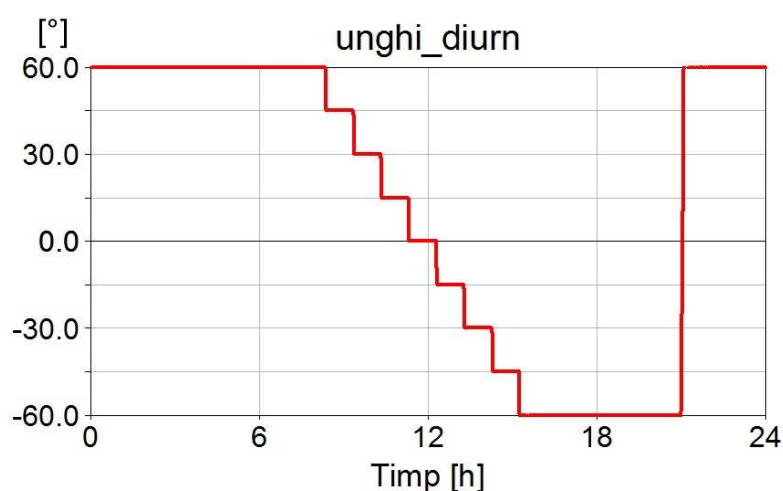


Figura 6.9. Legea de mișcare - orientare (N = 322).

În continuare, prin integrarea curbelor de putere s-a obținut cantitatea de energie electrică produsă de un modul din sistemul orientat, respectiv fix (fig. 6.10), în ziua considerată, după cum urmează: $E_{gT} = 1219,6$ Wh/zi, $E_{gF} = 1009,44$ Wh/zi. Pentru șirul cu 3 module, se obține: $E_{gT} = 3658,8$ Wh/zi, $E_{gF} = 3028,32$ Wh/zi.

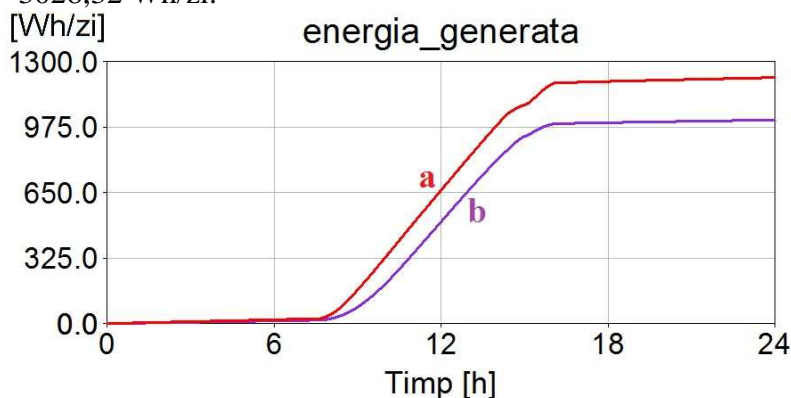


Figura 6.10. Energia produsă de un modul din sistemul mobil (a), respectiv fix (b) (N=322).

Înregistrări și prelucrări/calculare similare s-au efectuat pentru mai multe zile, cu diverse condiții climatice și legi de mișcare impuse sistemului. Pe lângă cantitatea de energie produsă de sistem (orientat - E_{gT} , respectiv fix - E_{gF}), s-a măsurat (utilizând un wattmetru) puterea electrică

necesară (energia consumată) pentru realizarea legii de mișcare. Astfel a fost posibilă realizarea bilanțului energetic al sistemului de orientare, prin utilizarea relației 4.4.

6.4. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Din cele prezentate anterior se extrag următoarele **concluzii**:

- pentru condiții meteorologice diverse (senin, înnorat, ploaie) din sezonul de toamnă (septembrie - noiembrie), în care s-au făcut înregistrări/prelucrări de date experimentale, relativ la sistemul (modelul) de referință fix, prin orientarea mono-axială a șirului de module fotovoltaice se obține un aport de energie de aproximativ 18%;
- pentru zilele însorite, rezultatele experimentale validează/confirmă destul de bine datele obținute prin rularea/simularea prototipului virtual al sistemului de orientare (modelul teoretic al radiației solare ia în considerare doar componenta directă, nu și pe cea difuză - predominantă în condiții de cer înnorat);
- în zilele cu cerul total acoperit de nori și ploaie se recomandă ca sistemul să fie orientat fix către Sud (nu se justifică orientarea).

Principalele **contribuții originale** din acest capitol pot fi sintetizate astfel:

- conceperea desenelor de execuție și participare la realizarea și implementarea prototipului fizic al șirului de module fotovoltaice cu mecanism de orientare;
- realizarea programului de control pentru sistemul de orientare;
- achiziția și interpretarea datelor experimentale.

7. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA REZULTATELOR

7.1. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Obiectivul general al tezei de doctorat constă din *creșterea eficienței energetice și economice a sistemelor de orientare pentru șiruri de module fotovoltaice prin acționarea simultană a modulelor de la o singură sursă motoare, studiul fiind abordat în concept mecatronic*. Acest obiectiv a fost atins prin realizarea obiectivelor operaționale și a condus la următoarele concluzii finale și contribuții originale.

Concluzii finale:

- șirurile de module fotovoltaice cu orientare simultană aduc un avantaj important, cel al eficienței energetice și economice crescute (una sau două surse motoare pe sistem);
- cele 12 zile reprezentative din an, corespondente cu energia medie a fiecărei luni, determinate cu ajutorul programului dezvoltat în Matlab (cu două seturi de simulări - cea mai scurtă, respectiv cea mai lungă zi din lună) sunt: 16, 46, 75, 105, 135, 160, 198, 229, 259, 289, 319, 344;
- unghiul de elevație optim pentru programul de orientare anual, în zona geografică Brașov, este $\gamma^*=42^\circ$, în timp ce pentru programul de orientare sezonier, γ^* are valorile $70^\circ, 60^\circ, 48^\circ, 34^\circ, 22^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 44^\circ, 58^\circ, 65^\circ$ și 70° - corespunzătoare lunilor anului;
- domeniul optim al unghiului diurn β^* pentru programul de orientare sezonier este $[+60^\circ; -60^\circ]$, aflat la o diferență de maxim 1% (eficiență de orientare) față de $[+75^\circ; -75^\circ]$ și respectiv $[+90^\circ; -90^\circ]$;
- pentru programul de orientare anual, domeniul optim al unghiului diurn β^* este $[+60^\circ; -60^\circ]$, la o diferență în minus de 0,75% față de $[+75^\circ; -75^\circ]$ și respectiv 0,78% față de $[+90^\circ; -90^\circ]$;
- pentru zona geografică Brașov, nu se justifică utilizarea unui program de orientare bi-axial, datorită eficienței de orientare cu doar 4% mai mare decât cea a unui program de orientare mono-axial;
- un șir de trei module fotovoltaice acoperă necesarul de energie electrică pentru alimentarea unei cabane, bateriile având un ciclu de funcționare cu 5 zile încărcare și 2 zile descărcare;
- soluția optimă a mecanismului de orientare pentru șirul de module fotovoltaice este: *un mecanism de orientare mono-axial, având unghiul de înclinare (elevație) fix optim determinat, acționat de un motor rotativ poziționat pe axul primului modul, cu transmiterea mișcării în serie între module realizată prin transmisii cu lanț*;
- mecanismul de orientare propus (mono-axial) este de tip modular, permite montarea de module cu dimensiuni diverse și poate fi adaptat pentru orientare bi-axială;
- factorul extern principal este vântul, prin construcția distribuției presiunii vântului pe suprafața modulului și situațiile de încărcare specifice, obținându-se momentele maxime generate de acțiunea vântului, după cum urmează: 18,11 Nm - pentru încărcare pe lățimea modulului, respectiv 36,22 Nm - pentru încărcare pe lungimea modulului;
- modelarea și simularea în mediu virtual precede realizarea - implementarea prototipului fizic, vizând evaluarea comportamentului cinematic și dinamic al mecanismului de orientare (încadrarea în limitele funcționale);
- caracteristicile masico-inerțiale ale corpurilor reprezintă date de intrare pentru conceperea modelului dinamic al mecanismului de orientare, și pot fi determinate/prelevate din modelul solid (dezvoltat în mediu CAD) al sistemului;
- prin construcție, sistemul propus este bine echilibrat, fapt demonstrat de valorile relativ reduse ale momentului motor (maxim aproximativ 1,5 Nm);

- ca o consecință a concluziei anterioare, puterea necesară pentru orientarea modulelor este redusă, cu efect pozitiv asupra energiei consumate pentru realizarea orientării (și deci asupra eficienței energetice a sistemului);
- în condițiile utilizării ca dispozitiv de control a unui controler tip filtru trecere-joasă (LPF), sistemul de control cu o singură buclă nu asigură stabilitatea mecanismului de orientare;
- monitorizarea a doi parametri (poziție și viteză) cu controlere LPF asigură stabilitatea mecanismului de orientare;
- schema de control în cascadă cu două bucle asigură totodată robustețea sistemului atunci când asupra acestuia acționează factori externi (ex. vânt);
- stabilitatea și robustețea sistemului de control în cascadă se evidențiază și în situația în care se modifică masa ansamblului (de exemplu, prin utilizarea unor module cu dimensiuni mai mari, sau prin antrenarea simultană a mai multor module);
- integrarea dispozitivului mecanic și a sistemului de control la nivelul prototipului virtual permite ca cele două componente să fie testate - verificate împreună, minimizându-se astfel riscul ca legea de control să nu fie urmărită (respectată cu acuratețe) de dispozitivul mecanic;
- trei dintre strategiile investigate în procesul de optimizare/acordare a controlerelor (DOE Screening - Interactions - Full Factorial, DOE Response Surface - Interactions - D-Optimal și DOE Response Surface - Cubic - D-Optimal) oferă rezultate corespunzătoare, fără a fi necesară finisarea funcției de regresie, prima strategie fiind selectată pentru optimizarea sistemului de orientare;
- prin acordarea corespunzătoare a controlerelor se minimizează erorile de orientare, valorile optime obținute pentru factorii de amplificare ai controlerelor de poziție și viteză fiind $K_p = 2487$ și $K_v = 1866$;
- eficiența energetică medie anuală a programului de orientare anual este de 35,23%, iar a celui sezonier de 31,60%;
- pentru condiții meteorologice diverse (senin, înnorat, ploaie) din sezonul de toamnă (septembrie – noiembrie), în care s-au făcut înregistrări/prelucrări de date experimentale, relativ la sistemul (modelul) de referință fix, prin orientarea mono-axială a șirului de module fotovoltaice se obține un aport de energie de aproximativ 18%;
- pentru zilele însorite, rezultatele experimentale validează/confirmă destul de bine datele obținute prin rularea/simularea prototipului virtual al sistemului de orientare (modelul teoretic al radiației solare ia în considerare doar componenta directă, nu și pe cea difuză - predominantă în condiții de cer înnorat);
- în zilele cu cerul total acoperit de nori și ploaie se recomandă ca sistemul să fie orientat fix către Sud (nu se justifică orientarea).

Contribuții originale:

- determinarea celor mai importante zile din an pentru zona geografică Brașov, în funcție de energia medie a lunii;
- determinarea perechii optime de unghiuri pentru două programe de orientare (sezonier și anual), pereche reprezentată de valoarea unghiului de elevație și domeniul unghiular al unghiului diurn;
- determinarea numărului optim de pași de mișcare/orientare și a momentelor optime de acționare a sistemului, pentru cele 12 zile reprezentative din an;
- dimensionarea șirului de module fotovoltaice din punct de vedere al necesarului energetic;
- determinarea soluției optime a sistemului de orientare - *mechanism de orientare mono-axial, având unghiul de înclinare (elevație) fix optim determinat, acționat de un motor rotativ poziționat pe axul primului modul, cu transmiterea mișcării în serie realizată prin transmisii cu lanț;*

- determinarea a trei variante de mecanisme de orientare derivate din soluția de bază: mecanism de orientare mono-axial în care angrenajul melcat este înseriat cu un angrenaj conic, mecanism de orientare bi-axial cu reglarea continuă a unghiului de elevație printr-un mecanism șurub-piuliță, respectiv mecanism de orientare bi-axial cu reglarea manuală în trepte a unghiului de elevație;
- determinarea momentelor de încărcare determinate de acțiunea vântului;
- modelarea solidă a mecanismului de orientare în mediu CAD (SolidWorks) și transferul – integrarea modelului solid în softul de analiză MBS ADAMS;
- modelarea ca sistem multicorp a mecanismului de orientare (separat pe subsisteme și în ansamblu);
- conceperea modelelor pentru analiza în mediu virtual (model cinematic, model dinamic invers, model dinamic);
- stabilirea ipotezelor pentru modelarea preliminară a sistemului de control;
- dezvoltarea și simularea a trei modele pentru sistemul fotovoltaic cu mecanism de orientare: model pentru determinarea câștigului energetic; model pentru sistem fotovoltaic cu schemă de control mono-bucă; model pentru sistem fotovoltaic cu schemă de control în cascadă cu două bucle;
- determinarea schemei de control optime pentru asigurarea stabilității și robusteții: control în cascadă cu două bucle, cu controlere tip LPF, care controlează/monitorizează poziția sistemului (unghiul diurn) și respectiv viteza unghiulară a rotorului;
- finalizarea prototipului virtual al sistemului prin modelarea frecărilor în cuple;
- definirea modelelor pentru transferul de date MBS (ADAMS) ↔ DFC (MATLAB);
- conceperea schemei de control și modelarea sistemului de orientare în concept mecatronic;
- definirea funcției obiectiv și a variabilelor de proiectare pentru procesul de optimizare a sistemului de orientare;
- construirea/rularea strategiilor de investigare a sistemului și identificarea strategiei optime;
- optimizarea sistemului de orientare - determinarea valorilor optime ale factorilor de amplificare ai controlerelor;
- determinarea eficienței energetice pentru programele de orientare anual & sezonier și determinarea eficienței medii anuale a fiecărui program;
- conceperea desenelor de execuție și participare la realizarea și implementarea prototipului fizic al șirului de module fotovoltaice cu mecanism de orientare;
- realizarea programului de control pentru sistemul de orientare;
- achiziția și interpretarea datelor experimentale.

7.2. DISEMINAREA REZULTATELOR

Cercetările teoretice și experimentale derulate în vederea elaborării prezentei lucrări au fost valorificate prin:

1. 16 articole științifice (11 ca prim autor), dintre care:
 - 3 articole indexate ISI (1 în revistă cotate ISI):
 - **Tatu, I.N.**, Alexandru, C., *Design and simulation of a photovoltaic string with tracking mechanism*, Environmental Engineering and Management Journal - EEMJ, vol. 10, nr. 9, p. 324-328, ISSN 1582-9596, Accession Number WOS: 000296758400020, 2011 (factor de impact 1,435);
 - **Tatu, I.N.**, Alexandru, C., *Designing the tracking system for a string of photovoltaic modules*, Advanced Materials Research, vol. 463-464, p. 1589-1592, ISSN 1662-8985, DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.463-464.1589, 2012;

- **Tatu, I.N.**, Alexandru, C., *Modeling and simulation of the tracking mechanism for a PV string*, IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics - AQTR, p. 428-433, ISBN 978-146730702-4, DOI 10.1109/AQTR.2012.6237748, 2012;
 - 8 articole indexate BDI;
 - 4 articole în alte categorii;
 - 1 articol în curs de evaluare:
 - **Tatu, I.N.**, Alexandru, C. *Optimal design of the solar tracker used for a photovoltaic string*, Journal of Renewable and Sustainable Energy, American Institute of Physics (factor de impact 1,214).
2. propunere de brevet:
- **Tatu, I.N.**, Alexandru, C., *Mecanism de orientare pentru un șir de module fotovoltaice*, nr. înregistrare OSIM: A/00310/7-05-2012.
3. participarea la conferințe internaționale de specialitate (ex. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition - EUPVSEC, 2010, Valencia, Spania; 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition - EUPVSEC, 2011, Hamburg, Germania; Conference on Sustainable Energy CSE, 2011, Brașov, România; IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics - AQTR, 2012, Cluj-Napoca, România).

7.3. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Ca și direcții viitoare de cercetare se propun următoarele:

- analiza cu elemente finite (FEA) a sistemului de orientare pentru șirul de module fotovoltaice;
- analiza, simularea și optimizarea mecanismelor de orientare bi-axiale propuse în capitolul 3;
- introducerea de parametri climatici noi (ex. radiația difuză) pentru a rafina/finisa modelul radiației solare și legea de mișcare (orientare);
- proiectarea - implementarea unui sistem de control inteligent, capabil să adapteze orientarea șirului de module fotovoltaice în funcție de prognoze și date meteo reale.

BIBLOGRAFIE SELECTIVĂ:

8. Alexandru, C., **Tatu, I.N.**, *Modeling and analysis of the photovoltaic tracking systems as multibody systems*, Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series I – Engineering Sciences, vol. 3(52), p. 47-54, ISSN 2065-2119, 2010.
9. Alexandru, C., **Tatu, I.N.**, *Simulating the virtual prototype of a photovoltaic tracking mechanism*, Academic Journal of Manufacturing Engineering, vol. IX, nr. 1, p. 6-11, ISSN 1583-7904, 2011.
10. Alexandru, C., **Tatu, I.N.**, *The virtual prototype of a photovoltaic system with solar tracker*, Proceedings of the 1st International Conference on Quality and Innovation in Engineering and Management – QIEM, Cluj-Napoca, p. 383-386, ISBN 978-973-662-614-2, 2011.
16. Baltas, P., Tortoreli, M., Russel, P., *Evaluation of power output for fixed and step tracking photovoltaics*, Solar Energy, Vol. 37 (2), p. 147-163, 1986.
17. Barkat, B., Mohammedi, B., Bendaas, M.C., *Mechanical design of a sun tracking system with two axis for arid areas*, VI World Renewable Energy Congress VI, Brighton, UK, p. 825-831, 2000.
18. Bostan, I., Dulgheru, V., Sobor, I., Bostan, V., Sochireanu, A., *Sisteme de conversie a energiilor regenerabile*, Ed. Tehnica-Info, Chişinău, 2007.
20. Burduhos, B.G., Diaconescu, D.V., Vătăşescu, M.M., Săulescu, R.G., **Tatu, I.N.**, *Energy comparison of pv systems with mono- and bi-axial pseudo-equatorial tracking mechanisms*, 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guanajuato, México, 19-25 June, IMD-123, 2011.
21. Butuc, B. R., *Sistem de orientare azimutală cu roţi dinţate pentru platforme fotovoltaice*, Braşov, 2011.
27. Clifford, M.J., Eastwood, D., *Design of a novel passive tracker*, Solar Energy, Vol. 77 (3), p. 269-280, 2004
28. Coste, L., *Modelarea radiaţiei solare pentru optimizarea proiectării sistemelor de conversie a energiei solare*, Braşov, 2010.
32. Dombi, V., Vişa, I., Diaconescu, D. V., Vătăşescu, M.M., **Tatu, I.N.**, *Energy response of a mono-axis tracked solar thermal collector with vacuum tubes*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Spania, Nr. 9, ISSN 2172-038X, 2011.
34. Duffie, J. A., Beckman, W. A., *Solar Engineering of thermal processes – 2nd edition*, A Wiley Interscience Publication, 1991.
41. Huang, B.J., Sun, F.S., *Feasibility study of one axis three positions tracking solar PV*, Energy Conversion and Management, Vol. 48 (4), p. 1273-1280, 2007.
44. Jula, A., Chişu, E., Moldovean, Gh., Pascovici, M., Velicu, D., Cârciumaru G., Marin, Gh., Vişa, I., Ciobanu, M., Radu, A., Diaconescu, D.V., *Organe de maşini vol 2*, Universitatea din Braşov, 1989.
49. Markat, T., Castañer, L., *Photovoltaics: Fundamentals and applications*, Ed. Elsevier, Amsterdam, 2006.
54. Meliss, M., *Regenerative energiequellen: praktikum, chapter 1: Berechnung von sonnenstand und strahlung*. Springer - Verlag, Berlin, 1997.
56. Narvarte, L., Lorenzo, E., *Tracking gains and ground cover ratio*, Proceedings of the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, European Commission & WIP Renewable Energies, Milano, p. 3153-3156, 2007.
66. Roth, P., Georgiev, A., Boudinov, H., *Cheap two axis sun following device*, Energy Conversion and Management, Vol. 46 (7-8), p. 1179-1192, 2005.
70. Sala, G., Pachon, D., Anton, I., *Test, rating and specification of PV concentrator components and systems*. Instituto de Energia Solar, Madrid, 2002.

78. **Tatu, I.N.**, Alexandru, C., *A study on the tracking mechanisms of the photovoltaic modules*, Annals of the Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering, vol. IX (XIX), nr. 1, p. 59-66, ISSN 1583-0691, 2010.
79. **Tatu, I.N.**, Alexandru, C., *Design and optimization of a photovoltaic system with tracking mechanism*, Ovidius University Annals of Mechanical, Industrial and Maritime Engineering, Constanța, vol. XII, nr. 1, p. 243-248, ISBN 978-973-614-541-4, 2010.
80. **Tatu, I.N.**, Alexandru, C., *Design and simulation of a photovoltaic string with tracking mechanism*, Environmental Engineering and Management Journal - EEMJ, Vol. 10, Nr. 9, p. 324-328, ISSN 1582-9596, Accession Number WOS: 000296758400020 (factor de impact 2011 - 1,435), 2011.
81. **Tatu, I.N.**, Alexandru, C., *Designing the tracking system for a string of photovoltaic modules*, Advanced Materials Research, vol 463-464, p. 1589-1592, ISSN 1662-8985, DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.463-464.1589, 2012.
82. **Tatu, I.N.**, Alexandru, C., *Modeling and simulation of the tracking mechanism for a PV string*, IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, IEEE Catalog Number CFP12AQT-CDR, ISBN: 978-1-4673-0703-1, ID: 078-122, 2012.
83. **Tatu, I.N.**, Alexandru, C., *Mono-axis vs bi-axis tracking for a string of photovoltaic modules*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Spania, Nr. 9, ID 696, ISSN 2172-038X, 2011.
84. **Tatu, I.N.**, Alexandru, C., *Optimization of the tracking mechanism for a PV string*, Journal of Mechanics Engineering and Automation, vol. 1, nr. 3, p. 211-216, David Publishing, USA, ISSN 2159-5275, 2011.
85. **Tatu, I.N.**, Alexandru, C., *Tracking mechanism for a group of photovoltaic modules*, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Valencia, Spain, pp. 4424-4428, ISBN 3-936338-26-4, DOI 10.4229/25thEUPVSEC2010-4BV.1.15, 2010.
86. **Tatu, I.N.**, Alexandru, C., V. Dombi, *A step-by-step tracking program for a string of photovoltaic modules*, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Spania, Nr. 9, ID 695, ISSN 2172-038X, 2011.
87. **Tatu, I.N.**, Alexandru, C., Enescu M., *Designing and optimizing the control system of the tracking mechanism for a string of photovoltaic modules*, European Photovoltaic Solar Energy Conference, EUPVSEC, Hamburg, Germania, p.3795-3798, ISBN 3-936338-27-2, DOI 10.4229/26thEUPVSEC2011-4AV.3.43, 2011.
89. Tymvios, F.S., Jacovides, C.P., Scouteli, C., *Comparative study of angstrom's and artificial neural networks methodologies in estimating global solar radiation*, Solar Energy, Vol. 78 (6), p. 752-762, 2005.

Brevete (selecție):

98. Bernabe, J. F. P., WO 2010/007193 A1, *Multiple operating system for solar tracking devices*, 2010.
99. Corio, R.P., US 2008/030891 A1, *Single axis solar tracking system*, 2008.
102. M. Navanteri, WO 2008/010250 A2, *Support device for photovoltaic panels with azimuth and altitude solar tracking*, 2008.
103. **Tatu, I.N.**, Alexandru, C., *Mecanism de orientare pentru un șir de module fotovoltaice*, A/00310/7-05-2012.

Site-uri (selecție):

119. <http://us.sunpowercorp.com/>, accesat 25/09/2011.
121. <http://www.effizienz-plus.de/en.les.com>, accesat 12/03/2012.

Analiza și optimizarea mecanismelor de orientare pentru șiruri de module fotovoltaice
Analysis and optimization of the tracking mechanisms for strings of photovoltaic modules

Doctorand: Nicoleta - Irina Tatu

Conducător: prof. dr. ing. Cătălin Alexandru

REZUMAT

Cuvinte cheie: *șir de module fotovoltaice, mecanism de orientare, sistem de control, sistem mecatronic, prototipare virtuală.*

Obiectivul general al tezei constă din creșterea eficienței energetice și economice a șirurilor de module fotovoltaice cu orientare mono-axială, prin acționarea simultană a modulelor de la o singură sursă motoare, studiul fiind abordat în concept mecatronic. Obiectivul propus este îndeplinit prin proiectarea unui sistem de orientare, care maximizează cantitatea de radiație solară captată, minimizând totodată energia consumată pentru realizarea orientării. Pentru început, se determină programul optim de orientare specific zonei geografice de implementare, prin stabilirea următoarelor date: domeniul unghiular pentru mișcarea diurnă, numărul de pași de mișcare (inclusiv dimensiunea pașilor), momentele de acționare. Mecanismul de orientare propus este modelat în mediu CAD (SolidWorks), în vederea determinării proprietăților masico-inerțiale ale corpurilor. Modelul solid este ulterior transferat în mediu MBS (ADAMS), pentru analiza, optimizarea și simularea comportamentului sistemului. În continuare, prin utilizarea unei soluții software de tip DFC (MATLAB/Simulink), se stabilește schema optimă de control (sistem de control în cascadă cu două bucle și controlere tip filtru-trecere-joasă) și se verifică stabilitatea & robustețea sistemului. Prototipul virtual al sistemului de orientare este dezvoltat în concept mecatronic prin integrarea modelului mecanic și a sistemului de control. Sistemul de orientare este optimizat din punctul de vedere al parametrilor controlerelor (factorii de amplificare), vizându-se minimizarea erorii de orientare. Studiul se bazează pe modelul funcției de regresie obținută prin testarea mai multor strategii de investigare DOE (Design of Experiments). Pe baza rezultatelor obținute prin testarea în mediu virtual, se proiectează - realizează prototipul fizic pentru un șir de module fotovoltaice cu orientare mono-axială, modelul experimental fiind implementat la Institutul CDI – Produse High Tech pentru Dezvoltare Durabilă (Pro-DD) al Universității Transilvania din Brașov.

ABSTRACT

Keywords: *photovoltaic string, tracking mechanism, control system, mechatronic system, virtual prototyping.*

The general objective of the thesis consists of increasing the energetic and economic efficiency of the tracking systems for strings of photovoltaic modules by simultaneously tracking the modules from a single motor source, the study being approached in mechatronic concept. The proposed objective was fulfilled by designing a string of photovoltaic modules with tracking mechanism, which maximizes the quantity of received solar radiation and minimizes the energy consumption during tracking. In the beginning, it is determined the optimum tracking program, specific to the implementation geographical area, by establishing the following data: the angular domain for the daily motion, the number of motion steps (including the step size), and the actuating/operating time. The tracking mechanism is modeled in a CAD environment (SolidWorks), for determining the mass & inertial properties. The solid model is then transferred to the MBS environment (ADAMS), for analyzing, optimizing and simulating the system's behavior. Further, using a DFC software solution (MATLAB/Simulink), the optimum control scheme is determined (two-loops control system with low-pass filters), and there are verified the stability and robustness performance. The virtual prototype of the tracking system is developed in mechatronic concept by integrating the mechanical device model and the control system model. The tracking system is optimized in terms of the controllers parameters (amplification factors), focusing on minimizing the tracking errors. The study is based on the regression function model obtained by several DOE (Design of Experiments) investigation strategies. Based on the simulation results, the physical prototype (i.e. the experimental model) is designed and developed, considering a string of photovoltaic modules with mono-axial tracking. The experimental model was implemented at the CDI Institute - High Tech Products for Sustainable Development (Pro-DD) of the Transilvania University of Brașov.

Curriculum vitae

Informații personale

Prenume, Nume	Irina Nicoleta TATU
Adresă	Brașov, România
Telefon	+40745452949
E-mail(uri)	tatu_irina@yahoo.com, nicoleta-irina.tatu@unitbv.ro
Data și locul nașterii	22 octombrie 1985, Rm. Vâlcea, Vâlcea

Educație

2009-2012	Doctorat în domeniul: <i>Inginerie Mecanică</i> , Tema tezei: <i>Analiza și optimizarea mecanismelor de orientare pentru șiruri de module fotovoltaice</i> , Universitatea Transilvania din Brașov, Centrul de cercetare Sisteme de Energii Regenerabile și Reciclare
2004 - 2009	Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor secția <i>Electrical Engineering and Computers</i> (predare limba engleză), Universitatea Transilvania din Brașov, calificare Inginer Diplomat în Inginerie Electrică
2000 - 2004	Colegiu Național Alexandru Lahovari secția <i>Fizică - chimie</i> , Rm. Vâlcea
Cursuri	Octombrie 2007, Programming in JAVA - Level 1, Pro-Management, București Octombrie 2007, 3D Studio Max, Pro-Management, București Februarie 2011, ADAMS - Basic Module, Magic Engineering, Brașov Iunie 2011, Sistem fotovoltaic autonom, Asociația Română a Electricienilor, București

Limbi străine Engleză - foarte bine, Franceză - începător

Publicații 15 articole științifice (3 ISI, 9 BDI, 4 alte categorii), o propunere de brevet

Competențe și aptitudini de utilizare a calculatorului Matlab, SolidWorks, MSC ADAMS, Microsoft Office (Word, Excel, Power Point, Project)

Curriculum vitae

Personal Information

Surname, Name **Irina Nicoleta TATU**
 Address Brașov, Romania
 Phone +40745452949
 E-mails tatu_irina@yahoo.com, nicoleta-irina.tatu@unitbv.ro
 Date and place of birth 22 octombrie 1985, Rm. Vâlcea, Vâlcea

Education

2009-2012 PhD in the domain: *Mechanical Engineering*, Phd Thesis: *Analysis and optimization of the tracking mechanisms for strings of photovoltaic modules*, Transilvania University from Brașov, Research center Renewable Energies Systems and Recycling
 2004 - 2009 Electrical Engineering and Computer Science Faculty department *Electrical Engineering and Computers* (english teaching), Transilvania University from Brașov, qualification engineer in electrical engineering
 2000 - 2004 Alexandru Lahovari National College department *Physics - Chemistry*, Rm. Vâlcea

Training courses
 October 2007, Programming in JAVA - Level 1, Pro-Management, București
 October 2007, 3D Studio Max, Pro-Management, București
 February 2011, ADAMS - Basic Module, Magic Engineering, Brașov
 June 2011, Standalone photovoltaic system, Romanian Association of Electricians, București

Foreign languages English - very good, French - beginner

Publications 15 scientific articles (3 ISI, 9 BDI, 4 other categories), one patent proposal

Computer Skills Matlab, SolidWorks, MSC ADAMS, Microsoft Office (Word, Excel, Power Point, Project)