



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



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: „Burse doctorale pentru dezvoltare durabilă” BD-DD

Numărul de identificare al contractului: POSDRU/107/1.5/S/76945

Beneficiar: Universitatea Transilvania din Brașov

Universitatea *Transilvania* din Brașov

Școala Doctorală Interdisciplinară

Departament: Design de Produs, Mecatronică și Mediu

Ing. Monica Alina IONIȚĂ (căș. Boțoman)

**Creșterea eficienței sistemelor de șiruri fotovoltaice prin
orientare pseudo-azimutală**

**Increasing the efficiency of photovoltaic arrays through
pseudo-azimuthal tracking**

Conducător științific

Prof.dr.ing. Cătălin ALEXANDRU

BRAȘOV, 2013

D-lui (D-nei)

COMPONENȚA

Comisiei de doctorat

Numită prin ordinul Rectorului Universității „Transilvania” din Brașov
Nr. **5934** din **19.07.2013**

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. Nicolae DUMITRU**
Universitatea din Craiova

Prof.dr.ing. Daniela TARNIȚĂ
Universitatea din Craiova

Prof.dr.ing. Petre ALEXANDRU
Universitatea Transilvania din Brașov

Data, ora și locul susținerii publice a tezei de doctorat: **29 Octombrie 2013**,
ora **10⁰⁰**, sala **EII4 (Căsuța solară)**.

Eventualele aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării vă rugăm să
le transmiteți în timp util, pe adresa monica.ionita@unitbv.ro sau
monica.ionita@yahoo.com.

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

Vă mulțumim.

CUPRINS (lb. română)

	Pg. teza	Pg. rezumat
INTRODUCERE	4	
1. STADIUL ACTUAL ÎN DOMENIUL SISTEMELOR DE ORIENTARE PENTRU MODULE FOTOVOLTAICE	5	7
1.1 Aspecte generale privind sistemele fotovoltaice	5	7
1.2 Sisteme de orientare pentru module fotovoltaice	12	7
1.3 Sisteme de orientare pentru platforme de șiruri fotovoltaice.....	19	8
1.4 Concluzii și obiective ale tezei	25	10
2. MODELAREA RADIAȚIEI SOLARE ȘI A PROGRAMULUI DE ORIENTARE	27	11
2.1 Aspecte generale privind radiația solară	27	11
2.2 Unghiurile de orientare solară și unghiurile de orientare a platformei de șiruri PV	30	11
2.3 Determinarea perechii de unghiuri pentru sistemul pseudo-azimutal	36	14
2.4 Concluzii și contribuții originale	44	17
3. MODELAREA, SIMULAREA ȘI OPTIMIZAREA MECANISMULUI DE ORIENTARE A PLATFORMEI DE ȘIRURI PV	46	19
3.1 Stabilirea soluției optime a mecanismului de orientare	46	19
3.2 Modelarea și simularea mecanismului de orientare a platformei de șiruri PV...	55	22
3.2.1 Modelarea acțiunii vântului	55	22
3.2.2 Modelarea CAD a mecanismului de orientare	59	24
3.2.3 Analiza mecanismului de orientare în mediu MBS	63	26
3.3 Optimizarea mecanismului de orientare a platformei de șiruri PV	74	32
3.3.1 Optimizarea mecanismului destinat orientării diurne	75	33
3.3.2 Optimizarea mecanismului destinat mișcării de elevație.....	81	35
3.4 Concluzii și contribuții originale.....	91	37
4. PROTOTIPAREA VIRTUALĂ A SISTEMULUI DE ORIENTARE A PLATFORMEI DE ȘIRURI PV	93	39
4.1 Aspecte privind controlul sistemelor de orientare	93	39
4.2 Modelarea sistemului de control al mecanismului de orientare pseudo- azimutal	95	39
4.3 Optimizarea sistemului de control (controlerului)	102	41
4.4 Proiectarea optimală a legii de mișcare	110	43
4.5 Concluzii și contribuții originale	121	47

5. REALIZAREA ȘI TESTAREA MODELULUI EXPERIMENTAL	123	49
5.1 Dezvoltarea modelului experimental	123	49
5.2 Implementarea modelului experimental	127	50
5.3 Achiziția și prelucrarea datelor experimentale	128	50
5.4 Concluzii și contribuții originale	135	53
6. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA		
REZULTATELOR	136	54
6.1 Concluzii finale și contribuții originale	136	54
6.2 Diseminarea rezultatelor	140	56
6.3 Direcții viitoare de cercetare	141	57
BIBLIOGRAFIE	142	58
ANEXE		
Scurt Rezumat	151	60
CV	152	61

CONTENT

	Thesis	Summ.
INTRODUCTION	4	
1. STATE OF ART IN THE TRACKING SYSTEMS FOR PHOTOVOLTAIC MODULES	5	7
1.1 General aspects of photovoltaic systems	5	7
1.2 Tracking systems for photovoltaic modules	12	7
1.3 Tracking systems for the strings platforms.....	19	8
1.4 Conclusions and thesis objectives	25	10
2. MODELING THE SOLAR RADIATION AND THE TRACKING PROGRAM	27	11
2.1 General aspects regarding the solar radiation	27	11
2.2 The solar angles and the angles of the PV platform	30	11
2.3 Determining the pair of angles for the pseudo-azimuthal system	36	14
2.4 Conclusions and original contributions	44	17
3. MODELING, SIMULATING AND OPTIMIZING THE TRACKING MECHANISM OF THE PHOTOVOLTAIC MODULES STRINGS PLATFORM	46	19
3.1 Establishing the optimal solution of the tracking mechanism	46	19
3.2 Modeling and simulation of the tracking mechanism for the PV platform	55	22
3.2.1 Modeling the wind action	55	22
3.2.2 CAD modeling of the tracking mechanism	59	24
3.2.3 Analyzing the tracking mechanism in MBS environment	63	26
3.3 Optimizing the tracking mechanism for the photovoltaic modules strings platform.....	74	32
3.3.1 Optimizing the tracking mechanism for the daily motion	75	33
3.3.2 Optimizing the tracking mechanism for the elevation motion	81	35
3.4 Conclusions and original contributions.....	91	37
4. VIRTUAL PROTOTYPING OF THE TRACKING SYSTEM FOR THE PV PLATFORM	93	39
4.1 Aspects regarding the control system	93	39
4.2 Modeling the control system of the pseudo-azimuthal tracking mechanism ..	95	39
4.3 Optimizing of the control system (controller)	102	41
4.4 Optimal design of the motion law	110	43
4.5 Conclusions and original contributions	121	47

5. ACHIEVING AND TESTING THE EXPERIMENTAL MODEL	123	49
5.1 Developing the experimental model	123	49
5.2 Implementation of the experimental model	127	50
5.3 Aquisition and processing the experimental data	128	50
5.4 Conclusions and original contributions.....	135	53
6. FINAL CONCLUSIONS AND ORIGINAL CONTRIBUTIONS.		
RESULTS DISSEMINATION	136	54
6.1 Final conclusions and original contributions	136	54
6.2 Results dissemination	140	56
6.3 Future researches	141	57
REFERENCES	142	58
ANNEXES		
Abstract	151	60
CV	152	61

1. STADIUL ACTUAL ÎN DOMENIUL SISTEMELOR DE ORIENTARE PENTRU MODULE FOTOVOLTAICE

1.1. ASPECTE GENERALE PRIVIND SISTEMELE FOTOVOLTAICE

Cercetările în domeniul surselor regenerabile de energie reprezintă o prioritate la nivel mondial, deoarece acestea oferă alternative viabile la o serie de probleme majore: caracter limitativ și poluant al combustibililor fosili, încălzirea globală sau efectul de seră. Până în anul 2020 se intenționează scăderea consumului de energie obținută din combustibili fosili cu 32%, aceasta putând fi realizată inclusiv prin utilizarea sistemelor de energii regenerabile (soare, vânt, apă, biomasă). Energia solară este cea mai importantă sursă de energie regenerabilă, putând fi transformată în energie electrică sau termică. Metoda de conversie a radiației solare în energie electrică este bine cunoscută: efectul fotovoltaic.

Radiația solară este data de intrare principală în proiectarea sistemelor de conversie a energiei solare. Factorii care influențează fenomenul de conversie fotovoltaică sunt: radiația solară (ca element principal al conversiei fotovoltaice), factorii de mediu - vânt, zăpadă, grindină, gheață (ca elemente ce pot periclita suprafața modulelor fotovoltaice), temperatura, umiditatea și precipitațiile [31].

1.2. SISTEME DE ORIENTARE PENTRU MODULE FOTOVOLTAICE

Gradul de utilizare a radiației solare poate fi maximizat prin utilizarea de sisteme de orientare a modulelor fotovoltaice în funcție de poziția Soarelui pe bolta cerească. Orientarea modulelor PV poate crește eficiența sistemului de conversie cu valori cuprinse între 20-50% [4, 15, 20, 25, 35, 51, 62, 66, 75, 80, 82], gradul maxim de colectare a energiei solare fiind obținut atunci când radiația solară este normală pe suprafața receptorului (modulului fotovoltaic).

În funcție de numărul modulelor orientate și dispunerea acestora, sistemele de orientare se pot clasifica astfel (fig. 1.7):

- a. sisteme de orientare pentru module individuale – modulele sunt montate individual pe cadre de susținere și sunt acționate de propriile surse motoare;
- b. sisteme de orientare pentru șiruri – modulele sunt montate individual, dar orientate simultan, fie utilizând o singură sursă motoare (sisteme de orientare mono-axiale), fie două surse motoare (sisteme de orientare bi-axiale);
- c. sisteme de orientare pentru platforme – modulele sunt montate pe același cadru de susținere (tip platformă), iar sursa/sursele motoare orientează întreaga platformă;
- d. sisteme de orientare pentru platforme de șiruri - modulele sunt montate pe șiruri individuale, care la rândul lor sunt dispuse pe un cadru comun tip platformă.

În funcție de modul de operare, sisteme de orientare pot fi clasificate astfel:

- sisteme de orientare *pasive*, în care mișcarea de orientare este obținută prin expansiunea termică a unui fluid pe bază de Freon (datorită sensibilității la căldură) într-un tub montat paralel cu modulul fotovoltaic [16].
- sisteme de orientare *active* – sunt sisteme mecatronice bazate pe dispozitive acționate, de regulă, electric (pentru sisteme mari, de tip platformă-șir, acționarea poate fi hidraulică), care pot include mecanisme cu roți dințate, mecanisme cu bare articulate, transmisii cu lanț, fir sau curea [57].



Figura 1.7. Tipuri de sisteme de orientare: a. modul individual [11], b. șiruri [109], c. platformă [110], d. platformă de șiruri [111].

La orientarea modulelor fotovoltaice trebuie avute în vedere cele două mișcări din sistemul astronomic Soare-Pământ: mișcarea diurnă și mișcarea sezonieră. Astfel, s-au sistematizat două tipuri fundamentale de mecanisme de orientare: mecanisme de orientare după o singură axă (mono-axiale), respectiv după două axe (bi-axiale).

În cazul sistemelor bi-axiale, literatura de specialitate prezintă 4 tipuri principale, în funcție de modul în care sunt amplasate axele de rotație: ecuatoriale, pseudo-ecuatoriale, azimutale și pseudo-azimutale.

După cum s-a precizat, sistemele de orientare active sunt sisteme mecatronice, care integrează componente mecanice (dispozitivul mecanic), electronice & informatice (dispozitivul/sistemul de control). Din punct de vedere al sistemului de control, literatura prezintă sisteme în circuit închis, bazate pe utilizarea de fotosenzori (fig. 1.14, a), care sunt responsabili pentru discriminarea poziției Soarelui. Orientarea bazată pe senzori poate introduce erori în detectarea poziției Soarelui pe bolta cerească în condiții atmosferice variabile. Alternativa o constituie sistemele de control în circuit deschis (fig. 1.14, b), bazate pe algoritmi ce furnizează parametrii predefiniți de control pentru motoare în funcție de pozițiile Soarelui, care pot fi determinate cu precizie pentru orice zonă geografică.

Din punct de vedere al controlerului, literatura prezintă diferite soluții, de la controlere clasice din familia PID (Proportional-Integral-Derivative) până la controlere moderne de tip robust sau adaptiv (FLC - Fuzzy Logic Controller, FNLC - Fuzzy Logic Neural Controller) [1, 7, 18, 65, 71, 89].

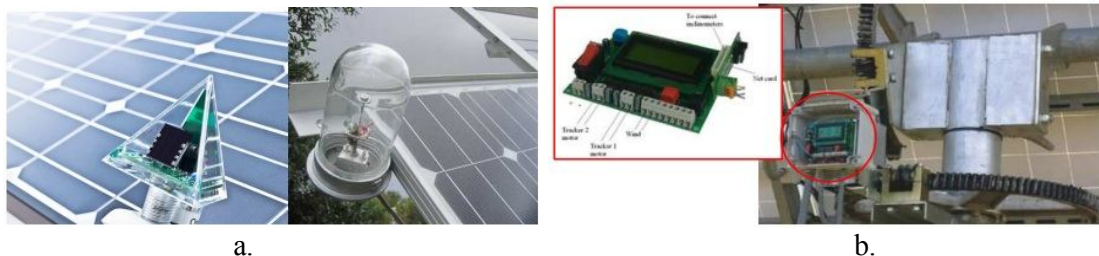


Figura 1.14. Sistem în circuit închis (a), respectiv deschis (b) [77].

1.3. SISTEME DE ORIENTARE PENTRU PLATFORME DE ȘIRURI FOTOVOLTAICE

Relativ recent apărute, sistemele de orientare pseudo-azimutale sunt derivate din cele azimutale în scopul creșterii stabilității structurii, fiind cea mai bună variantă pentru a orienta platforme de șiruri de module fotovoltaice.

În sistemele fotovoltaice cu orientare pseudo-azimutală, mișcarea diurnă și mișcarea de elevație sunt definite astfel:

- *unghiul diurn* este unghiul conținut în planul vertical Est-Vest, fiind format de proiecția razei solare și verticala locului (axa zenitală),
- *unghiul de elevație* este unghiul format între raza solară și planul vertical Est-Vest .

În continuare se prezintă câteva soluții de sisteme de orientare pentru platforme de șiruri fotovoltaice. În figura 1.18 este prezentat un sistem de orientare pseudo-azimutal bi-axial, în care mișcarea diurnă este realizată prin actuatorul liniar (110), care rotește cadrul platformei. Transmiterea mișcării de elevație între module se realizează cu un mecanism multi-paralelogram, acționarea făcându-se la nivelul bielei de la actuatorul liniar (112). Acest sistem de orientare bi-axial are un randament cu 40% mai mare decât sistemul echivalent fix (fără orientare). Un avantaj al acestui sistem constă din posibilitatea de a fi amplasat atât pe un teren înclinat sau cu denivelări, cât și pe acoperișuri.

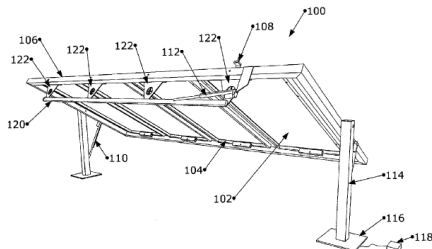


Figura 1.18. Sistem de orientare pseudo-azimutal bi-axial [95].



Figura 1.19. Sistem de orientare Sedona Energy Labs [113].

Pe baza brevetului cu soluția din figura 1.19, compania Sedona Energia Labs (USA) a lansat pe piață gama de produse IntelliTrack™ IT1500, IT 1800, IT2000: sisteme de orientare cu mișcare după o axă și după două axe. Sistemul de orientare în varianta bi-axial (IT 2000) are un randament cu 40% mai mare decât o instalație fixă și cu 20% mai mare decât o instalație mono-axială (înclinată la latitudinea zonei de instalare), prezentând o rezistență crescută la factorii perturbatori. În varianta mono-axială, IntelliTrack™ IT1800 are un domeniu unghiular pentru mișcarea zilnică de $[+45^\circ, -45^\circ]$, acționarea realizându-se cu un actuator liniar; sistemul poate genera cu 30% mai multă energie decât sistemul echivalent fix.

Sistemul de orientare bi-axial din figura 1.21 utilizează biele (14, 18) ca modalitate de transmitere a mișcării între module, atât pentru mișcarea diurnă cât și pentru mișcarea de elevație. Pentru realizarea orientării diurne, actuatorul liniar (15) acționează asupra bielei (14), mișcarea transmițându-se la cadrul platformei (12) prin intermediul tijei (16). Pentru mișcarea de elevație, actuatorul liniar (19) acționează asupra bielei (18), care transmite mișcarea la balansierele (17) articulate pe bielă.

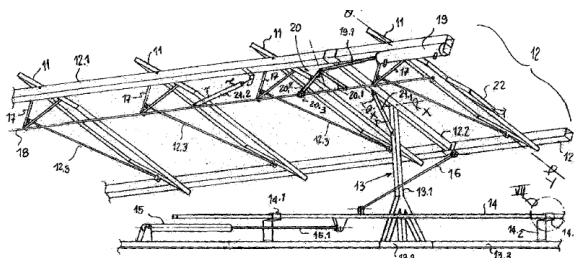


Figura 1.21. Sistem de orientare bi-axial pentru platformă de șiruri [93].

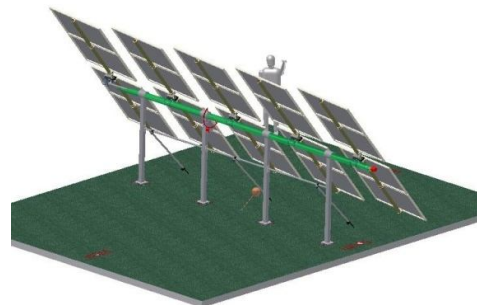


Figura 1.24. Sistem de orientare bi-axial pentru șiruri de platforme [117].

În figura 1.24 se prezintă o platformă de șiruri cu orientare bi-axială. Motorul pentru mișcarea diurnă antrenează un sector de roată melcată, care este montat fix pe axul central al platformei. Mișcarea de elevație se transmite de la motorul montat în capătul axului central prin intermediul unui mecanism multi-paralelogram dispus în interiorul axului (fiecare modul/șir este cuplat la câte un balansier al mecanismului paralelogram).

1.4. CONCLUZII ȘI OBIECTIVE ALE TEZEI

În urma analizei stadiului actual al cercetărilor în domeniul sistemelor fotovoltaice se desprind următoarele **concluzii**:

- gradul de conversie a energiei solare în electricitate poate fi îmbunătățit prin optimizarea conversiei la nivelul modulului, prin materiale și tehnologii de depunere performante, respectiv prin maximizarea gradului de colectare a radiației solare, ceea ce implică utilizarea sistemelor pentru orientarea modulului;
- majoritatea sistemelor/soluțiilor din literatura de specialitate se referă la orientarea modulelor individuale, șirurilor de module și respectiv platformelor fotovoltaice;
- sistemul de orientare pseudo-azimutal, derivat din sistemul azimutal prin schimbarea poziționării axei mișcării diurne (de pe verticală pe orizontală) reprezintă cea mai bună soluție pentru a orienta platforme de șiruri de module fotovoltaice, datorită stabilității structurii;
- în literatura de specialitate, aria de cercetare a mecanismelor care transmit mișcarea între șirurile platformei fotovoltaice este insuficient explorată, reducându-se de regulă la prezentare de soluții, fără fundamentare teoretică;
- ca surse de acționare a mecanismelor de orientare pentru platforme de șiruri fotovoltaice se utilizează, de regulă, actuatori liniari, dar disponerea acestora nu se abordează în contextul creșterii eficienței sistemului (prin minimizarea forțelor motoare, deci a energiei consumate pentru realizarea orientării);
- mecanismele de transmitere a mișcării prin fir/cablu prezintă un dezavantaj important, cel al elasticității elementelor flexibile, permițând ca modulele să oscileze sub acțiunea vântului;
- în vederea orientării și creșterii preciziei de orientare a platformelor de șiruri medii și mari se observă o tendință de utilizare a mecanismelor cu bare articulate.

Obiectivul general se referă la creșterea eficienței energetice a sistemelor fotovoltaice de tip platforme de șiruri cu orientare pseudo-azimutală bi-axială, prin maximizarea gradului de utilizare a radiației solare și minimizarea consumului energetic pentru realizarea orientării, studiul fiind abordat în concept mecatronic.

Acest obiectiv general este îndeplinit prin abordarea/rezolvarea următoarelor **obiective operaționale**:

1. determinarea unui program optim de orientare specific zonei geografice de implementare, Brașov, România (v. cap. 2);
2. proiectarea, modelarea și simularea mecanismului de orientare a platformei de șiruri fotovoltaice; optimizarea cinematico-dinamică a mecanismului de orientare (v. cap. 3);
3. proiectarea optimală a legii de mișcare pentru obținerea unui aport energetic maxim (v. cap. 4);
4. modelarea și simularea prototipului virtual al sistemului de orientare în concept mecatronic, prin integrarea dispozitivului mecanic cu sistemul de acționare & control (v. cap. 4);
5. conceperea și implementarea modelului experimental al sistemului de orientare pseudo-azimutal bi-axial; înregistrarea și prelucrarea datelor experimentale (v. cap. 5).

2. MODELAREA RADIAȚIEI SOLARE ȘI A PROGRAMULUI DE ORIENTARE

2.1. ASPECTE GENERALE PRIVIND RADIAȚIA SOLARĂ

Radiația solară este principalul parametru care influențează eficiența sistemelor fotovoltaice. În urma interacționării radiației solare cu atmosfera și suprafața Pământului au loc o serie de transformări, conform schemei din figura 2.1 [56].

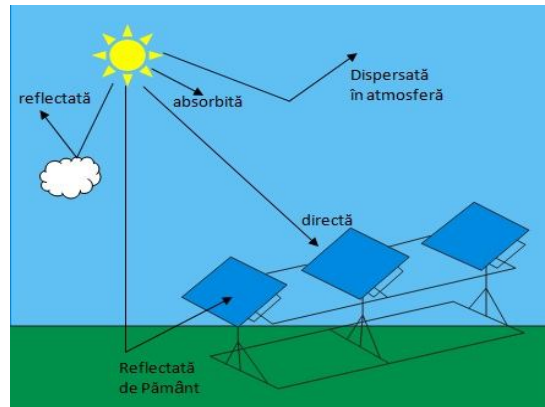


Figura 2.1. Componentele radiației solare.

Radiația solară este influențată de locația geografică vizată, configurația reliefului, sezon, ora din zi, condiții climatologice (nori, ploaie, claritatea aerului) și nivelul de poluare din acea zonă [10]. Pentru a implementa un sistem fotovoltaic, se estimează cantitatea de radiație solară, fie utilizând baze de date meteorologice, fie prin metode empirice (matematice), în vederea evaluării câștigului energetic pe care îl poate aduce sistemul [69, 84].

Radiația solară poate fi măsurată utilizând instrumente tradiționale, sau poate fi înregistrată digital cu un sistem de achiziții de date. În plus, diferite modele au fost dezvoltate pentru a estima radiația solară. Metoda liniară tradițională Angstrom se bazează pe măsurători de durată a luminii soarelui, în timp ce metodele moderne au la bază rețele neurale artificiale (ANN) [73], [83].

În prezenta lucrare, pentru modelarea radiației solare, se utilizează modelul empiric Meliss [61], care este apropiat de condițiile climatice din zona Brașov (v. subcap. 2.2).

2.2. UNGHIURILE DE ORIENTARE SOLARĂ ȘI UNGHIURILE DE ORIENTARE A PLATFORMEI DE ȘIRURI PV

Principiul de orientare a panourilor solare se bazează pe date referitoare la poziția Soarelui pe bolta cerească. Pentru a asigura cea mai mare posibil eficiență a conversiei energiei solare în energie electrică, razele Soarelui trebuie să cadă normal pe suprafața receptorului, astfel că este necesar ca sistemul să își modifice periodic poziția în așa fel încât să păstreze relația dintre razele Soarelui și modulul PV [3], [29].

În acest context, devine necesară modelarea orientării razei solare (unghiurile de orientare solară), urmând ca pe baza lor să se modeleze unghiurile de orientare a platformei de șiruri fotovoltaice. Pentru modelarea unghiurilor de orientare a razei solare, literatura de specialitate prezintă două sisteme de referință:

- sistemul de referință global (sau ecuatorial) OXYZ (fig. 2.2, a), în care sunt modelate unghiurile orientării ecuatoriale a razei solare (unghi orar ω și unghi de declinație δ [24], [27];
- sistemul de referință local QX₀Y₀Z₀ (fig. 2.2, b), în care sunt modelate unghiurile orientării azimutale a razei solare (unghi diurn ψ - azimut și unghi de elevație α - altitudine), [52], unghiurile de orientare pseudo-ecuatorială (unghi diurn β și unghi elevație γ) [59] și respectiv unghiurile de orientare pseudo-azimutală (unghi diurn ε și unghi de elevație ρ), acestea din urmă fiind utilizate/introduse cu ocazia prezentei cercetări.

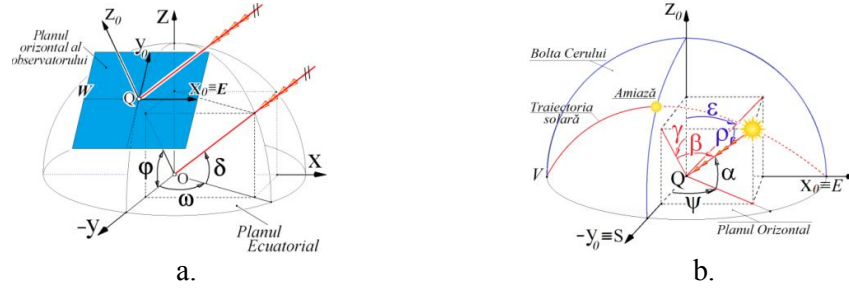


Figura 2.2. Sistemul de referință global OXYZ (a) & sistemul de referință local QX₀Y₀Z₀ (b).

Pentru simplificare, în lucrarea de față radiația directă este modelată în premisa cerului senin (fără nori) [23], [32]. Conform modelului Meliss, radiația solară directă poate fi estimată cu relația:

$$G_D = G_0 \cdot (1 + 0.0334 \cdot \cos(0.9856 \cdot N - 2.72)) \exp\left(-\frac{f_t}{0.9 + 9.4 \cdot \sin \alpha}\right) \quad (2.1)$$

în care G_0 este constanta solară medie (1367 W/m²), N - numărul zilei din an, f_t - factorul de turbiditate (claritatea atmosferei), α - unghiul altitudinal solar.

Unghiurile orientării ecuatoriale (ω și δ) sunt mărimi primare de calcul, fiind modelate prin relațiile [8], [60]:

$$\omega = 15^\circ \cdot (12 - ts) \quad (2.2)$$

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin \frac{360^\circ \cdot (N - 80)}{365} \quad (2.3)$$

unde ts reprezintă timpul solar.

Unghiul altitudinal (α) este unghiul care se formează între direcția razelor solare și planul orizontal al locului, determinându-se cu relația:

$$\alpha = \arcsin(\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega) \quad (2.4)$$

unde φ reprezintă latitudinea (unghiul măsurat de la Ecuator până la zona geografică de interes); pentru zona Brașov, $\varphi = 45,65^\circ$.

Relativ recent, pe piață a apărut un nou tip de sistem bi-axial de orientare, sub denumirea de sistem *pseudo-azimutal* (fig. 2.3), derivat din sistemul azimutal, dar având axa diurnă poziționată pe orizontală (și nu verticală, ca la sistemul azimutal).

Unghiurile de orientare pseudo-azimutală a platformei PV au fost notate cu ρ^* pentru mișcarea de elevație și cu ε^* pentru mișcarea diurnă. Unghiurile razei solare care determină acest tip de orientare se regăsesc sub notațiile ρ și ε , fiind definite astfel [86]:

- unghiul de elevație (ρ) - format între raza solară și planul vertical Est-Vest (X₀Z₀, fig. 2.2, b):

$$\rho = \arcsin(\cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \sin \varphi - \sin \delta \cdot \cos \varphi) \quad (2.5)$$

- unghiul diurn (ε) - conținut în planul vertical Est-Vest (fig. 2.2, b) și format de proiecția razei solare cu verticala locului Z₀ (axa zenitală):

$$\varepsilon = \arccos \frac{\cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \varphi + \sin \delta \cdot \sin \varphi}{\cos \rho} \cdot \operatorname{sgn} \omega \quad (2.6)$$

unde $\text{sgn } \omega$ este semnul unghiului orar (negativ înainte de amiaza solară și pozitiv după amiază).

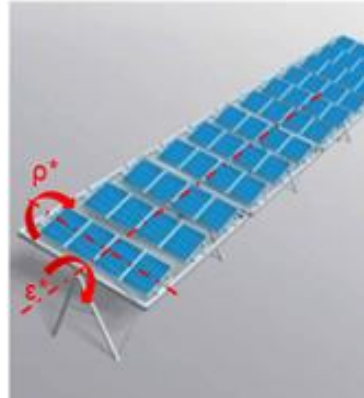


Figura 2.3. Sistem de orientare pseudo-azimutal [111].

Radiația solară incidentă (G_I), normală pe suprafața modulului fotovoltaic, are expresia:

$$G_I = G_D \cdot \cos i \quad (2.7)$$

unde G_D este radiația directă (v. rel. 2.1), iar i - unghiul de incidență.

Orientarea platformelor de șiruri PV are ca scop maximizarea componentei radiației solare receptate perpendicular pe suprafața fotovoltaică [26], [38], [68], iar pentru modelarea acesteia este necesară modelarea unghiului de incidență i , definit ca unghi între raza solară și normala pe modulul fotovoltaic [11]:

$$i = \arccos(\cos \rho \cdot \cos \rho^* \cdot \cos(\varepsilon - \varepsilon^*) + \sin \rho \cdot \sin \rho^*) \quad (2.8)$$

Evident, la orientarea continuă cu viteză variabilă, normala la modulul PV coincide permanent cu raza solară, în timp ce la o orientare în pași, normala la modulul PV și raza solară formează un unghi de incidență nenul, a cărui valoare maximă depinde de numărul și durata pașilor.

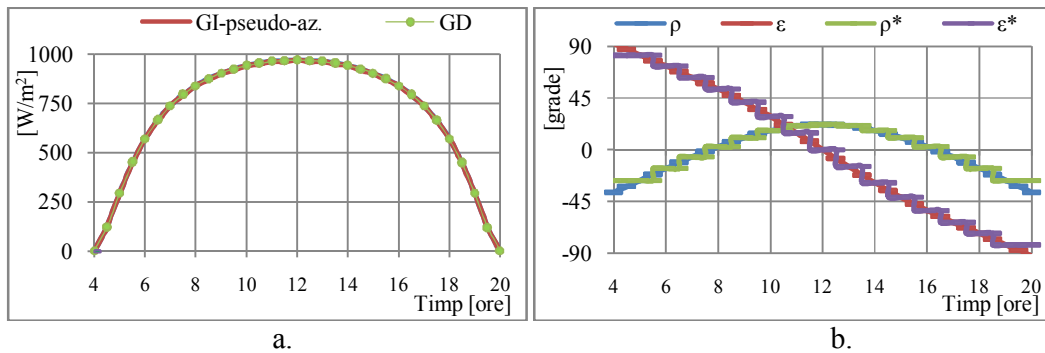


Figura 2.6. Variațiile unghiurilor de orientare pentru sistemul de tip pseudo-azimutal (a) și curbele de radiație directă & incidentă (b).

Modelarea legilor de variație în pași ale unghiurilor de orientare a platformei de șiruri PV trebuie să asigure o aproximare cât mai exactă a curbelor care descriu variațiile unghiurilor solare omoloage [42], [43]. În figura 2.6 s-au modelat variațiile acestor unghiuri în pași, cu staționare (între pași) constantă de 1 oră, aferente solstițiului de vară ($N = 172$), pentru zona Brașov - $\varphi = 45.65^\circ$ lat. N.

Cele două unghiuri ρ^* și ε^* reprezintă date de intrare, care definesc legea de mișcare pentru sistemele de orientare pseudo-azimutale. Unghiul diurn ε^* se consideră pozitiv dimineața și negativ după-amiaza, relativ la poziția de referință de amiază - $\varepsilon^* = 0^\circ$ (fig. 2.7,

a). Unghiul de elevație ρ^* este pozitiv la rotația în sens trigonometric (conform schemei din figura 2.7, b) și negativ la rotația în sens orar relativ la poziția de referință orizontală - $\rho^* = 0^\circ$.

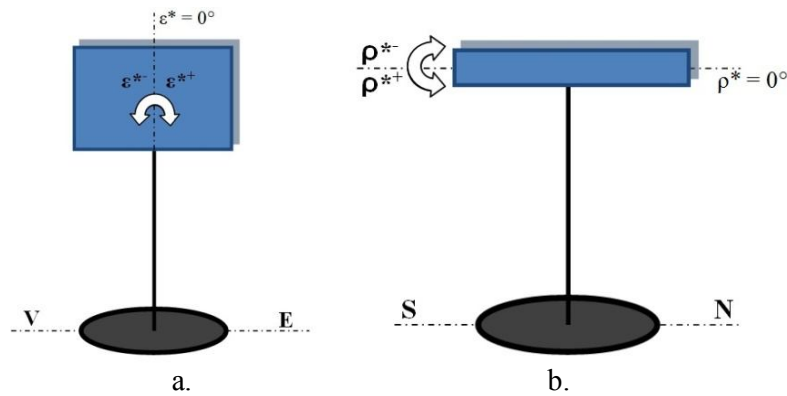


Figura 2.7. Pozițiile de referință ale unghiurilor sistemului fotovoltaic: diurn (a) și elevație (b).

2.3. DETERMINAREA PERECHII DE UNGHIURI PENTRU SISTEMUL PSEUDO-AZIMUTAL

Diverse strategii de orientare pot fi dezvoltate pentru a maximiza cantitatea de radiație solară captată de modulul PV. Prin poziționarea orizontală a modului se captează cea mai mare cantitate de radiație difuză (datorită distribuirii egale în atmosferă). Prin orientarea modului fotovoltaic se pierde o parte din radiația difuză. Totuși, câștigul de radiație directă obținut prin orientare este mult mai mare decât pierderea de radiație difuză. Datorită acestui fapt, în prezenta lucrare simulările s-au efectuat considerând doar componenta directă a radiației solare, în ipoteza de cer senin (fără considerarea radiației difuze). După cum s-a menționat, pentru a estima radiația solară directă (G_D) în zona Brașov s-a folosit modelul empiric Meliss [61], deoarece acest model este apropiat ca și condiții climatice (datele meteo pe care se bazează) de zona geografică Brașov.

Programele de orientare se modelează, de regulă, cu număr par de pași, datorită simetriei curbei radiației solare față de amiază [6]. Durata unui pas de orientare se consideră a fi compusă din durata în care se realizează schimbarea poziției unghiulare și durata menținerii acestei poziții (staționare) până în momentul reluării ciclului cu efectuarea unui nou pas. În funcție de durata pașilor, programele pot fi cu durată variabilă sau cu durată constantă [42], [81].

Modelarea legii de mișcare pentru orientarea pas cu pas presupune stabilirea numărului optim de pași și a momentului optim de acționare (subiect detaliat în capitolul 4 al tezei de doctorat), date care depind evident de ziua din an pentru care se face simularea. Pentru aceasta, s-a conceput în EXCEL un program bazat pe relațiile (2.1) - (2.8), cu care se determină numărul de pași și momentele de acționare. Programul se bazează pe următoarele premise de bază: numărul de pași este par, legea de mișcare fiind simetrică față de poziția de amiază; sistemul este menținut fix într-o anumită poziție atâta timp cât cantitatea de radiație incidentă este mai mare (cel puțin egală) cu valoarea care s-ar obține dacă sistemul ar fi menținut în poziția viitoare.

Pentru determinarea programului optim de orientare a platformei de șiruri de module PV s-au luat în calcul 12 zile reprezentative din an (una pentru fiecare lună). În fișierele de tip “.xls” concepute în Excel, s-au introdus ecuațiile (2.1) - (2.8), timpul de simulare corespunzând duratei zilei (de la răsărit la apus). Aceste fișiere permit generarea graficelor

radiației solare incidente. Ulterior, prin integrarea acestor curbe se obține cantitatea de energie disponibilă. Prin compararea cu energia medie a lunii, a rezultat ziua reprezentativă din lună.

Pentru validare, cele 12 zile reprezentative 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), respectiv cu metoda Duffie [30], rezultatele fiind prezentate în tabelul 2.1.

Programul de orientare este dezvoltat pentru un sistem de orientare de tip pseudo-azimutal, atât în varianta mono-axial, cât și bi-axial, având ca variabile unghiurile platformei (ε^* , ρ^*), funcția obiectiv fiind eficiența de orientare.

Domeniul unghiului diurn al platformei este de maxim 180° , iar unghiul de elevație ia valori în intervalul $[0^\circ; 70^\circ]$. Pentru a determina perechea optimă de unghiuri, s-au considerat următoarele domenii:

- unghiului diurn al platformei (ε^*) 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° (când sistemul este fix în poziția de amiază);
- unghiul de elevație al platformei (ρ^*) ia valori în intervalul $[0^\circ; 70^\circ]$.

Tabelul 2.1. Zilele reprezentative din an.

Lună	Zi (N)		
	Metoda declinației	Metoda Duffie	Metoda propusă
Ianuarie	17	17	16
Februarie	46	47	45
Martie	75	75	75
Aprilie	105	105	105
Mai	135	135	135
Iunie	162	162	160
Iulie	195	198	198
August	228	228	229
Septembrie	259	258	259
Octombrie	289	288	289
Noiembrie	319	318	319
Decembrie	344	344	344

S-au proiectat două tipuri de programe de orientare:

- anual – în care unghiul de elevație este menținut la o valoare fixă pe tot parcursul anului;
- sezonier – în care unghiul de elevație variază în fiecare lună.

Pentru a stabili unghiul de elevație optim anual, se determină energia medie produsă pentru fiecare domeniu unghiular al lui ε^* , cât și energia medie disponibilă rezultată din media energiilor disponibile corespunzătoare celor 12 zile reprezentative. Apoi, calculând eficiența de orientare se determină unghiul de elevație optim pentru programul de orientare anual (fig. 2.9).

Valorile optime ale unghiului de elevație pentru programul sezonier și respectiv anual, calculate în funcție de eficiența de orientare, sunt prezentate în tabelul 2.2.

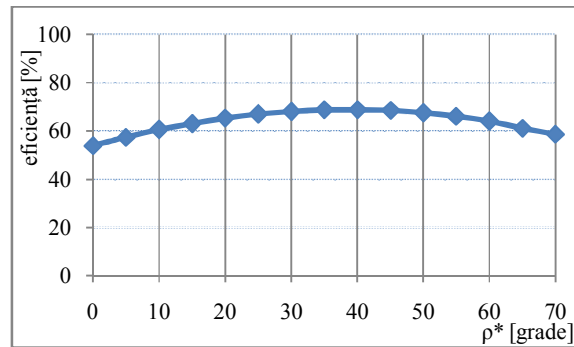


Figura 2.9. Determinarea unghiului de elevație optim pentru programul de orientare anual.

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

Program de orientare	Luna (ziua)	ρ^* [°]
Sezonier	1 (16)	61
	2 (45)	54
	3 (75)	39
	4 (105)	25
	5 (135)	12
	6 (160)	8
	7 (198)	11
	8 (229)	21
	9 (259)	35
	10 (289)	51
	11 (319)	62
	12 (344)	64
Anual	40°	

Totodată, au fost obținute curbele de radiație solară directă și respectiv incidentă pentru ziua reprezentativă din fiecare lună. De exemplu, în figura 2.10 sunt prezentate curbele de variație obținute pentru ziua reprezentativă a lunii iunie, N=160. Sunt considerate/reprezentate următoarele cazuri de orientare: pas-cu-pas cu program de orientare anual (mono-axial), pas-cu-pas cu program de orientare sezonier (bi-axial), ideal – orientare continuă (situație în care radiația incidentă este identică cu cea directă), respectiv sistem fix (fără orientare).

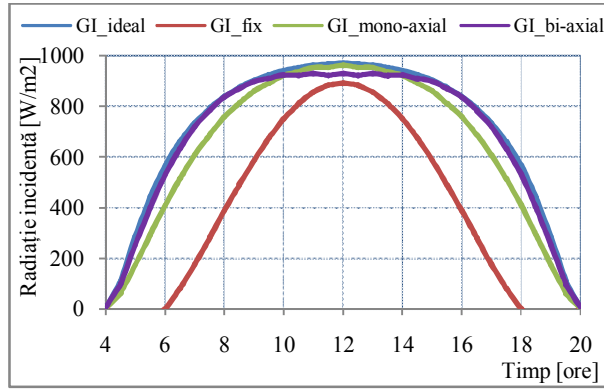


Figura 2.10. Curbele de radiație incidentă pentru cazurile de orientare ideal (continuu), fix, respectiv pas-cu pas ($N = 160$).

S-a făcut și o comparație între cele două programe de orientare, rezultând că programul bi-axial are o eficiență de orientare mai mare cu aproximativ 6% față de programul mono-axial (fig. 2.11). Întrucât diferența de eficiență între domeniile optim minim (120°) și optim maxim (180°) este foarte mică, doar de un procent, se alege domeniul unghiular pentru mișcarea diurnă $\varepsilon^* \in [+60^\circ, -60^\circ]$, pentru ambele programe de orientare (sezonier/bi-axial și anual/mono-axial).

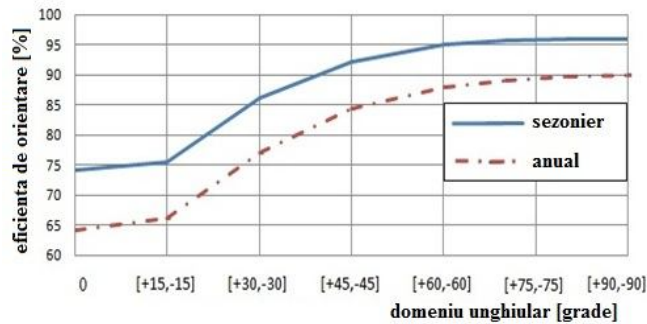


Figura 2.11. Comparație între programele de orientare sezonier și anual.

În concluzie, programul de orientare bi-axial este recomandat pentru zona geografică Brașov, studiul (teoretic și experimental) fiind dezvoltat în cele ce urmează pentru o platformă de șiruri de module fotovoltaice cu orientare bi-axială.

2.4. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

- Pe baza cercetărilor efectuate în acest capitol se desprind următoarele **concluzii**:
- pentru identificarea legii de orientare care asigură eficiența optimă pentru o anumită zonă geografică, este necesară efectuarea unei analize comparative a eficienței de orientare dezvoltată de sistemele mono-axiale și bi-axiale;
 - cele 12 zile reprezentative din an sunt: 16, 45, 75, 105, 135, 160, 198, 229, 259, 289, 319, 344 (unde „1” corespunde cu 1 Ianuarie);
 - unghiul de elevație ρ^* optim pentru programul de orientare sezonier, corespunzător celor 12 zile reprezentative din an, are valorile: 61° , 54° , 39° , 25° , 12° , 8° , 11° , 21° , 35° , 51° , 62° și 64° ;

- unghiul de elevație optim pentru programul de orientare anual, în zona geografică Brașov, este $\rho^* = 40^\circ$;
- domeniul optim al unghiului diurn ε^* este $[+60^\circ; -60^\circ]$, atât pentru programul anual cât și pentru cel sezonier, fiind aflat la o diferență de aproximativ 1% (ca eficiență de orientare) relativ la domeniul maxim $[+90^\circ; -90^\circ]$;
- sistemele de orientare de tip pseudo-azimutal bi-axiale au o eficiență mai ridicată decât cele mono-axiale, motiv pentru care sunt recomandate pentru zona geografică Brașov.

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

- determinarea zilelor reprezentative din an;
- analiza comparativă a eficiențelor de orientare pentru sistemele pseudo-azimutale în varianta bi-axial și mono-axial;
- determinarea perechii optime de unghiuri pentru cele două programe de orientare (sezonier și anual), pereche reprezentată prin domeniul unghiular al unghiului diurn și valoarea unghiului de elevație;
- modelarea eficienței de captare a radiației solare pentru sistemele de orientare pseudo-azimutale bi-axial și mono-axial;
- identificarea eficienței de orientare maximă pentru sistemele de orientare pseudo-azimutale bi-axiale și mono-axiale, pentru zona Brașov.

3. MODELAREA, SIMULAREA ȘI OPTIMIZAREA MECANISMULUI DE ORIENTARE A PLATFORMEI DE ȘIRURI PV

3.1. STABILIREA SOLUȚIEI OPTIME A MECANISMULUI DE ORIENTARE

În vederea evaluării comparative a sistemelor de orientare și alegerii soluției de principiu (pentru care se continuă studiile de analiză & optimizare), s-au aplicat tehnici specifice designului de produs: analiza multicriterială și analiza morfologică. **Analiza multicriterială** este o tehnică care se poate utiliza, cu rezultate de excepție, în multe domenii și situații: la diferite tipuri de clasamente; la designul unei creații (tehnice sau de altă natură); la evaluarea comparativă a mai multor variante de creații (obiecte sau subiecți etc.) și selectarea variantei optime; la punerea în ordine valorică, prin prisma unor criterii, a mai multor variante ale aceleiași realizări; la compararea uneia sau mai multor variante proprii cu variante existente ale unui produs, obiect, metodă etc. Analiza multicriterială este, în raport cu criteriile alese, o analiză care oferă, în proporție foarte mare, un caracter obiectiv rezultatelor, având în vedere următoarele considerente: ordinea criteriilor se stabilește comparând câte două criterii între ele; se ține cont, printr-o exprimare matematică simplă, că poziția relativă a două criterii poate cunoaște doar trei situații: un criteriu este mai important decât celălalt, un criteriu este la fel de important ca celălalt și un criteriu este mai puțin important decât celălalt; când se analizează comparativ diverse variante, analiza se face separat, pe fiecare criteriu.

În cazul platformelor de șiruri de module PV, o problemă importantă constă din realizarea stabilității, având în vedere gabaritul mare al structurii. Astfel, ținând cont și de aspectele anterior precizate, mecanismul de orientare bi-axial abordat în lucrare este de tip pseudo-azimutal, derivat dintr-un sistem azimutal, având axa orientării diurne (Est-Vest) poziționată pe orizontală.

Sistemul de orientare propus, conform figurii 3.1, este alcătuit din două subsisteme, corespunzătoare celor două axe de orientare. În cazul subsistemului destinat mișcării diurne (în jurul axei orizontale AA'), pistonul actuatorului (1), dispus în plan vertical, este articulat la cadrul platformei (3), în timp ce cilindrul actuatorului (2) este conectat la stâlpul de susținere fix (0). Modulele (4) sunt dispuse pe rame proprii, articulate prin rulmenți la cadrul platformei. Cadrul platformei este conectat la fiecare dintre cei trei stâlpi (frontal, median și posterior) prin cuple de rotație (A, A', A''), reprezentând rulmenții (evident, două dintre aceste articulații sunt pasive cinematic).

Subsistemul destinat mișcării de elevație (în jurul axelor BB') asigură orientarea simultană a modulelor (4) din șir de la un singur actuator liniar. Pistonul actuatorului (5) este articulat pe biela (7) a mecanismului paralelogram, care este articulată la cele trei balansiere (8). Cilindrul actuatorului (6) este articulat pe cadrul platformei (3). Prin utilizarea mecanismului multi-paralelogram se asigură simultaneitatea orientării modulelor după aceeași lege de mișcare.

- Printre avantajele sistemului propus se pot enumera:
- stabilitatea structurii, mecanismul pseudo-azimutal fiind cea mai bună variantă pentru a orienta platforme de șiruri de module fotovoltaice,
 - posibilitatea de implementare pentru orientarea platformelor medii și mari,
 - rama modulului fotovoltaic permite montarea de module de dimensiuni diverse,
 - mecanismul are aplicabilitate și în cazul colectoarelor termale,
 - funcționare corespunzătoare atât în condițiile unui regim de încărcare static cât și dinamic,
 - mecanismul are construcție simplă și fiabilitate ridicată.

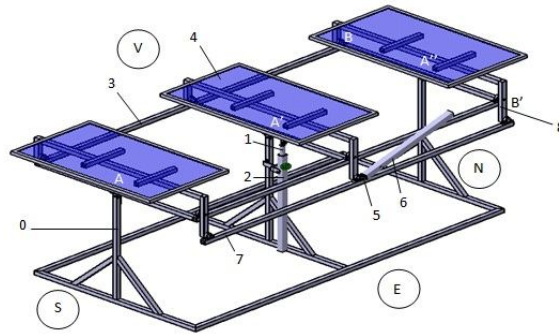


Figura 3.1. Mecanismul de orientare pseudo-azimutal pentru platforma de șiruri PV.

Din soluția de bază prezentată în figura 3.1 s-au obținut o serie de soluții derivate, descrise în cele ce urmează.

În figura 3.2 este prezentată o variantă pentru asigurarea orientării diurne, mișcarea fiind transmisă de la sursa motoare (actuator liniar) la platformă printr-un mecanism patrulater, destinat amplificării cursei unghiulare. Pistonul actuatorului (dispus în plan vertical) este articulat la balansierul mare (9) al mecanismului patrulater, mișcarea transmițându-se prin biela (10) la balansierul mic (11), care este montat fix pe axul de rotație al cadrului platformei. Balansierele mecanismului patrulater și cilindrul actuatorului sunt articulate pe structura (stâlpul) de susținere. Motivația introducerii mecanismului patrulater constă în utilizarea unui actuator de dimensiuni mici pentru realizarea unor curse unghiulare mari ale platformei, mecanismul acționând ca și amplificator de cursă. Subsystemul destinat mișcării de elevație este identic cu cel de la soluția de bază din figura 3.1.

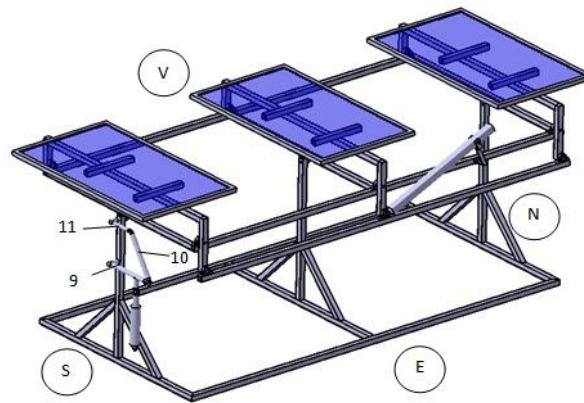


Figura 3.2. Mecanism de orientare pseudo-azimutal cu amplificator de cursă de tip patrulater.

În figura 3.3 este prezentată o altă variantă pentru asigurarea orientării diurne, derivată din soluția de bază, la care mișcarea diurnă este realizată cu ajutorul unui actuator liniar (dispus în plan orizontal), care acționează asupra unui angrenaj conic. Roata conică conducătoare (12) este acționată de pistonul actuatorului liniar, punctul de articulație a capului pistonului pe roată fiind dispus excentric față de centrul de rotație al roții. Roata conică condusă (13) este montată fix pe axul de rotație al cadrului platformei. Roțile angrenajului conic și cilindrul actuatorului sunt articulate pe structura (stâlpul) de susținere. Motivația introducerii angrenajului conic constă în amplificarea cursei unghiulare a platformei și respectiv eliminarea problemei unghiului de presiune (care poate conduce la auto-blocarea sistemului). Subsystemul destinat mișcării de elevație este identic cu cel de la soluția de bază (v. fig. 3.1).

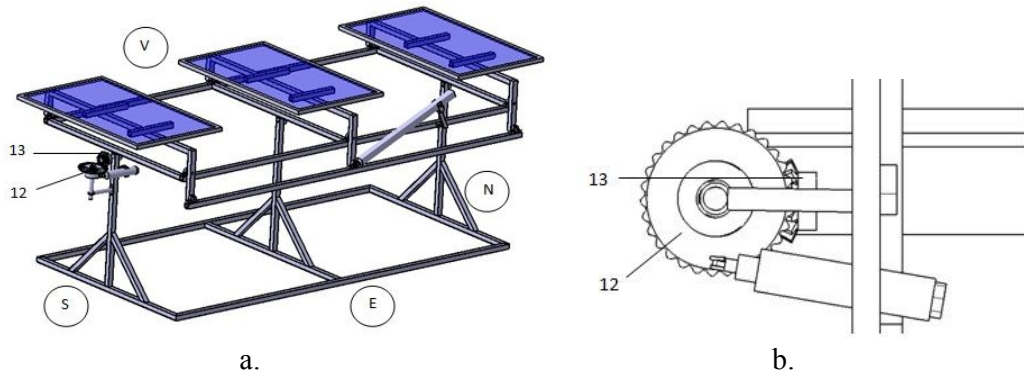


Figura 3.3. Mecanism de orientare pseudo-azimutal cu amplificator de cursă de tip conic.

În figura 3.4 este prezentată o soluție derivată de mecanism de orientare bi-axial cu o singură sursă motoare. Sistemul folosește o singură acționare (sursa motoare a mișcării diurne) pentru a genera ambele mișcări (diurnă și elevație), transmiterea și transformarea mișcării la nivelul axei de elevație realizându-se prin utilizarea unui angrenaj conic inseriat cu un mecanism pentalater. Schimbarea direcției de mișcare (de la axa mișcării diurne la axa mișcării de elevație) se realizează printr-un mecanism planetar conic, la care roata centrală (14) este montată fix pe structura (stâlpul) de susținere (în partea posterioară a structurii). Satelitul conic (15) este articulat pe brațul port-satelit (3') (montat fix pe cadrul platformei), transmițând mișcarea către balansierul de intrare (16) al unui mecanism pentalater (balansierul este montat pe același arbore cu satelitul). Balansierul de ieșire (17) al mecanismului pentalater este conectat rigid pe rama modulului.

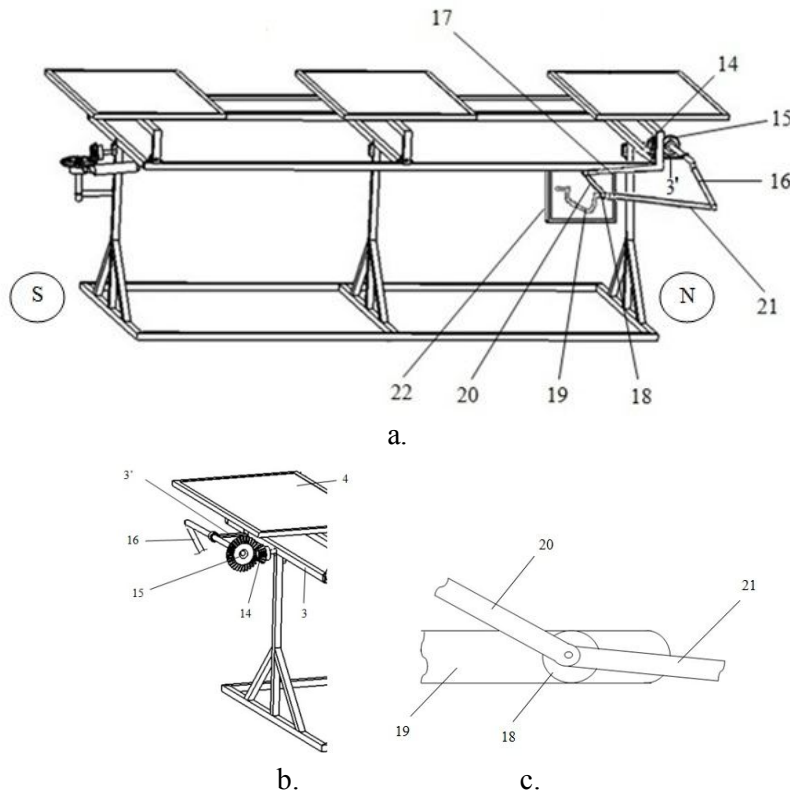


Figura 3.4. Mecanism de orientare pseudo-azimutal bi-axial cu o singură sursă motoare.

Mecanismul pentalater dispune de două grade de mobilitate, unul fiind controlat/impus prin mișcarea care provine dinspre axa mișcării diurne, iar celălalt grad de mobilitate este controlat geometric printr-o legătură de tip rolă (18) - ghidaj (19). Rola este articulată în nodul de conectare a bielelor (20), (21), iar ghidajul este practicat într-o placă (22) montată fix pe cadrul platformei. Forma geometrică a ghidajului este definită astfel încât să se asigure legea dorită pentru mișcarea de elevație, alternând zone de staționare (porțiuni de arc de cerc) cu zone de ridicare/coborâre.

Motivația introducerii acestui mecanism constă în reducerea numărului de surse motoare folosite pentru acționarea bi-axială a sistemului, în vederea creșterii eficienței economice (prin reducerea costului sistemului). Transmiterea mișcării de elevație între șiruri/module se realizează prin utilizarea mecanismului multi-paralelogram de la soluția de bază (v. fig. 3.1).

Dintre cele patru soluții prezentate, toate fiind încadrate într-o propunere de brevet [94], pentru această lucrare se reține ca soluție de bază mecanismul din figura 3.1, studiul teoretico-experimental fiind focalizat pe această soluție. Din punct de vedere teoretic, se vor face dezvoltări și pentru soluția derivată din figura 3.2, în special privitor la optimizarea geometrică a sistemului.

3.2. MODELAREA ȘI SIMULAREA MECANISMULUI DE ORIENTARE A PLATFORMEI DE ȘIRURI PV

Modelarea mecanismului de orientare a platformei PV este precedată de calculul momentelor de încărcare determinate de acțiunea factorilor externi (în principal acțiunea vântului). Acestea reprezintă date de intrare în procesul de proiectare a mecanismului de orientare.

3.2.1. Modelarea acțiunii vântului

Acțiunea factorilor externi (vânt, ploaie, grindină, zăpadă) și greutatea sistemului supun 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.

Datele climatice, înregistrate la stația meteorologică de pe Colina Universității - Brașov, arată că viteza vântului se încadrează între 0 și 15 m/s [78]. Pentru a determina sarcina maximă de încărcare a sistemului, în calculele care urmează se va lua în considerare o viteză maximă a vântului de 15 m/s. Distribuția presiunii vântului pe suprafața modulului poate fi de două tipuri: uniformă și neuniformă (trapezoidală) [13]. Astfel, în figurile care urmează sunt prezentate cele două tipuri de distribuție a presiunii, de-a lungul lungimii modulului - L (fig. 3.5), respectiv lățimii modulului - l (fig. 3.6).

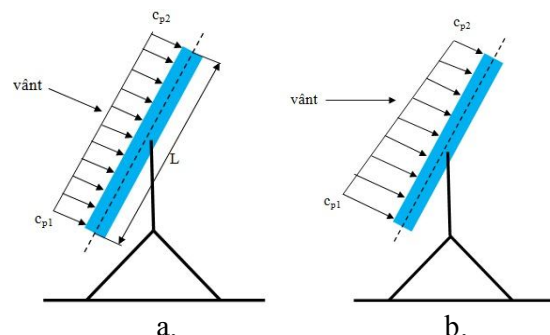


Figura 3.5. Distribuția presiunii vântului pe lungimea modulului: uniformă (a), neuniformă (b).

În funcție de distribuția presiunii vântului, în [13] s-au determinat tipurile de încărcare asupra modului fotovoltaic, prin punctul de aplicație al forței vântului și greutatea sistemului, prezentate în figura 3.7: (a) încărcare uniformă cu punctul de aplicație al forței în centrul de greutate al modului; (b) încărcare neuniformă pe lungimea modului, cu punctul de aplicație la distanța bL de centrul de greutate; (c) încărcare neuniformă pe lățimea modului, cu punctul de aplicație la distanța b_l de centrul de greutate.

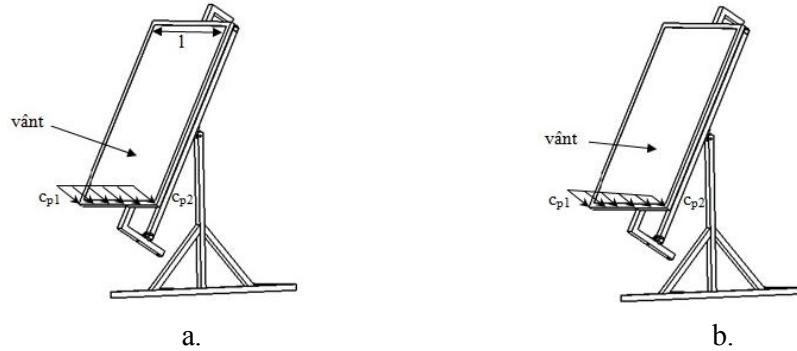


Figura 3.6. Distribuția presiunii vântului pe lățimea modului: uniformă (a), neuniformă (b).

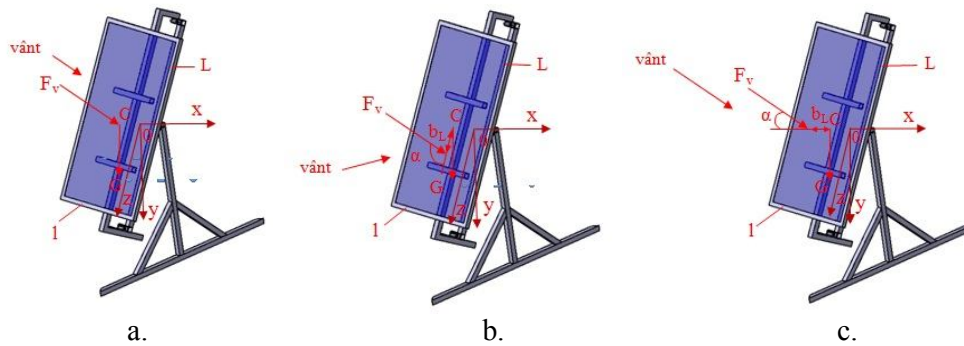


Figura 3.7. Tipurile de încărcare sub acțiunea vântului: încărcare uniformă (a), încărcare neuniformă pe lungimea modului (b), încărcare neuniformă pe lățimea modului (c).

Distanțele b_L și b_l dintre punctele de aplicație a forței vântului și centrul de greutate al modului se calculează cu relația următoare [13]:

$$b_{L/l} = \frac{d \cdot (c_{p1} - c_{p2})}{6 \cdot (c_{p1} + c_{p2})} \quad (3.2)$$

unde $d = L$ (lungimea modului) sau $d = l$ (lățimea modului), iar c_{p1} și c_{p2} sunt coeficienți de presiune [14].

Tabelul 3.3. Momentul generat de forța vântului, cu încărcare pe lățimea modului.

α [°]	c_{p1}	c_{p2}	c_p	ρ [kg/m ³]	v [m/s]	S [m ²]	l [m]	b [m]	F_v [N]	M_v [Nm]
0	1,02	1,02	1,02	1,23	15	1,7	1	0	239,94	0
15	1,02	1,02	1,02	1,23	15	1,7	1	0	239,94	0
30	1,02	1,02	1,02	1,23	15	1,7	1	0	239,94	0
45	1,27	0,76	1,02	1,23	15	1,7	1	0,03	239,94	5,09
60	1,36	0,68	1,02	1,23	15	1,7	1	0,05	239,94	10,38
75	0,85	0,17	0,51	1,23	15	1,7	1	0,1	119,97	11,58
90	0	0	0	1,23	15	1,7	1	0	0	0

Forța generată de acțiunea vântului (F_v) și momentul (M_v) determinat de aceasta se calculează cu relațiile:

$$F_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c_p \cdot S \quad (3.3)$$

$$M_v = b_{L/l} \cdot F_v \cdot \sin\alpha \quad (3.4)$$

unde ρ este densitatea aerului, v - viteza vântului, c_p - coeficientul de presiune (media aritmetică a celor doi coeficienți c_{p1} , c_{p2}), S - suprafața de acțiune a vântului, α - unghiul format de direcția forței vântului și suprafața modulului.

Tabelul 3.4. Momentul generat de forța vântului, cu încărcare pe lungimea modulului.

α [°]	c_{p1}	c_{p2}	c_p	ρ [kg/m ³]	v [m/s]	S [m ²]	L [m]	b [m]	F_v [N]	M_v [Nm]
0	1,02	1,02	1,02	1,23	15	1,7	1,7	0	239,94	0
15	1,02	1,02	1,02	1,23	15	1,7	1,7	0	239,94	0
30	1,02	1,02	1,02	1,23	15	1,7	1,7	0	239,94	0
45	1,27	0,76	1,02	1,23	15	1,7	1,7	0,05	239,94	8,48
60	1,36	0,68	1,02	1,23	15	1,7	1,7	0,08	239,94	16,62
75	0,85	0,17	0,51	1,23	15	1,7	1,7	0,17	119,97	19,69
90	0	0	0	1,23	15	1,7	1,7	0	0	0

Considerând un modul PV cu dimensiunile 1,7 x 1 m, s-au determinat momentele de încărcare produse de acțiunea vântului, rezultatele bazate pe ecuațiile (3.2) – (3.4) fiind prezentate în tabelele 3.3 și 3.4. Se observă că în ambele cazuri (încărcare pe lățimea, respectiv lungimea modulului), pentru $\alpha = 0^\circ$, 15° , 30° și 90° , momentele sunt nule, deoarece punctul de aplicație a forței vântului coincide cu centrul de greutate al modulului. De asemenea, pentru ambele situații, momentele maxime de încărcare se găsesc la $\alpha = 60^\circ$ și $\alpha = 75^\circ$.

Rezultatele astfel obținute au fost utilizate în procesul de proiectare a mecanismului de orientare, pentru dimensionarea componentelor/sistemului. Totodată, momentul maxim de încărcare a fost folosit în procesul de verificare a robusteții sistemului de control (subiect abordat în subcapitolul 4.3).

3.2.2. Modelarea CAD a mecanismului de orientare

Pentru a întocmi modelul dinamic al sistemului de orientare, sunt necesare, printre altele, caracteristicile masico-inerțiale (masa, localizarea centrului de masă, momentele și produsele de inerție) ale corpurilor ce alcătuiesc sistemul. Aceste date pot fi stabilite/determinate pe două căi: prin calcul analitic (pe baza relațiilor din mecanica generală), respectiv prin analiza modelelor în solid (3D) realizate cu ajutorul unui mediu specializat CAD - Computer Aided Design / Drafting (ex. CATIA, ProENGINEER, SolidWorks, AutoCAD).

Pentru prezenta lucrare, modelul în solid al mecanismului de orientare (corespunzător soluției de bază din figura 3.1) a fost realizat prin utilizarea pachetului software licențiat CATIA. Realizarea modelului CAD se bazează pe următoarele date:

- pentru baza sistemului (cadru de susținere – fig. 3.8, a) s-a folosit țevă rectangulară 50x50x4 mm, dimensionarea ținând cont de tipul de module utilizate și de distanța dintre acestea (pentru evitarea auto-umbririi);
- s-au folosit module cu dimensiunile 1700x1000 mm (fig. 3.8, b);
- pentru cadrul platformei (fig. 3.8, c) s-a folosit țevă rectangulară 50x50x5 mm, cadrul fiind montat pe structura de susținere prin rulmenți;

- pentru biela și balansierele mecanismului paralelogram (fig. 3.8, d) s-a folosit țevă rectangulară 50x40x3 mm, ținându-se cont de distanța dintre axe (2000 mm);
- modelul CAD al rulmenților a fost descărcat de pe website-ul www.skf.com, ținându-se cont de diametrul interior (25 mm) și abilitatea de oscilare pentru a putea corela axele modulelor (fig. 3.9);
- modelul CAD al actuatorului a fost realizat în funcție de caracteristicile de pe website-ul www.elero-linear.com (fig. 3.10).

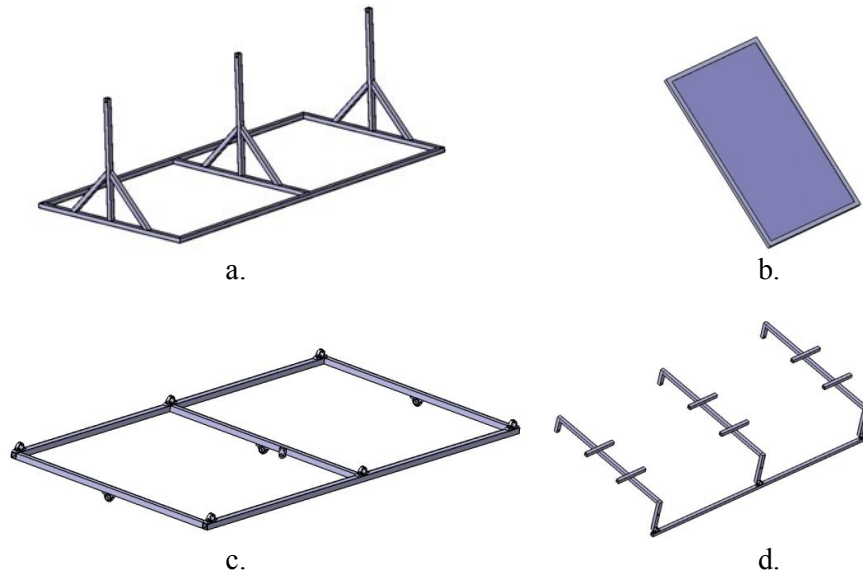


Figura 3.8. Componentele mecanismului de orientare: cadru susținere (a), modul PV (b), cadrul platformei (c), rame module, bielă & balansiere (d).

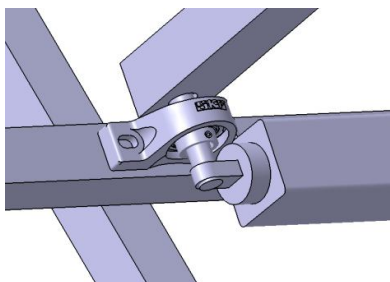


Figura 3.9. Detaliu articulare actuator cu rulment SKF.



Figura 3.10. Tipul de actuator utilizat pentru realizarea mișcărilor (diurnă & elevație).

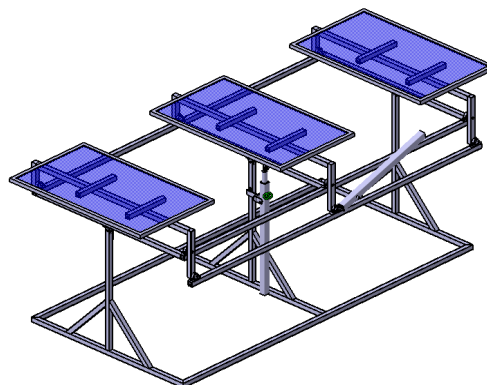


Figura 3.11. Modelul CAD al sistemului de orientare pseudo-azimutal.

Pe baza componentelor anterior modelate, în continuare s-a realizat ansamblul mecanismului de orientare, care este prezentat în figura 3.11 (corespunzător poziției de amiază a platformei).

Modelul CAD al sistemului de orientare, realizat după cum s-a precizat cu softul CATIA, a fost ulterior importat în softul de analiză & optimizare ADAMS, utilizând formatul de fișier STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data). Transferul se realizează prin intermediul interfeței ADAMS/Exchange (fig. 3.12).

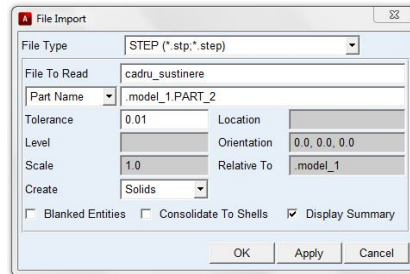


Figura 3.12. Fereastra de import ADAMS/Exchange pentru transferul modelului solid al cadrului de susținere (în format STEP).

3.2.3. Analiza mecanismului de orientare în mediu MBS

Pentru prezenta lucrare, analiza-simularea mecanismului de orientare pentru platforma de șiruri PV (mecanism descris în secțiunile anterioare) s-a realizat prin utilizarea pachetului software MBS ADAMS. Pentru parcurgerea etapelor incluse în metoda de analiză [88] s-au utilizat următoarele module: ADAMS/View – preprocesare (concepere model), ADAMS/Solver – procesare (rulare model), ADAMS/PostProcessor & Animation – postprocesare (prelucrare rezultate).

Modelarea ca sistem multicorp a mecanismului de orientare pentru platforma de șiruri PV a fost segmentată pe cele două subsisteme: subsistemul de transmitere a mișcării diurne, respectiv subsistemul de transmitere a mișcării de elevație.

Modelarea ca sistem multicorp a **subsistemului pentru mișcarea diurnă** a fost abordată pentru soluția de bază reprezentată în figura 3.1, respectiv pentru varianta derivată din figura 3.2.

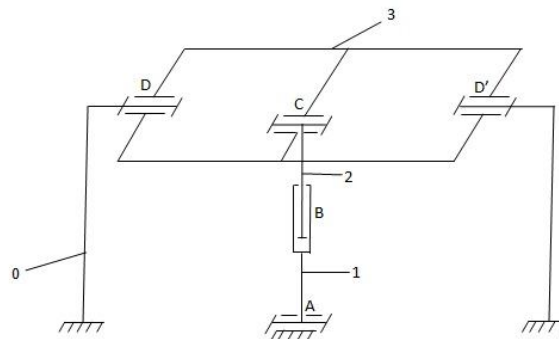


Figura 3.14. Modelul MBS al subsistemului pentru mișcarea diurnă - soluția de bază.

Pentru **soluția de bază**, mișcarea se transmite de la pistonul actuatorului direct la cadrul platformei, acesta fiind conectat la stâlpii de susținere prin cuple de rotație (DD'), materializând rulmenții. În cazul general (fig. 3.14), modelul MBS conține, pe lângă corpul

fix – suportul de susținere (0), 3 corpuri mobile: corpul de intrare – cilindrul actuatorului (1), corpul intermediar – pistonul actuatorului (2), respectiv corpul de ieșire - platforma (3).

Componentele actuatorului sunt conectate la elementele adiacente (suport, respectiv cadru) prin cuple de rotație (A, C), legătura dintre piston și cilindru fiind modelată prin cuplă de translație (B).

Pentru cazul cu număr minim de corpuri, modelul MBS (fig. 3.15) conține un corp fix - reprezentat de suportul de susținere (0), și un corp mobil - reprezentat de cadrul platformei (3). În acest caz, actuatorul liniar este modelat printr-o restricție de distanță variabilă între suportul de susținere și cadrul platformei, lungimea fiind controlată (impusă) printr-o constrângere cinematică de tipul $d_{AC} = f(\text{timp})$.

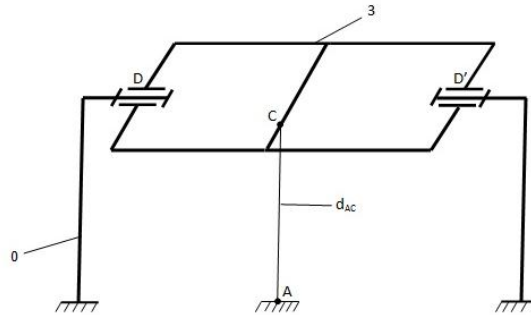


Figura 3.15. Modelul MBS cu număr minim de corpuri al subsistemului pentru mișcarea diurnă - soluția de bază.

Ambele modele MBS ale subsistemului mișcării diurne (v. fig. 3.14 & 3.15) dispun de un grad de mobilitate, corespunzător rotației platformei în jurul axei D-D', după cum urmează:

$$M = S \cdot (n_c - 1) - \sum r_g, \quad (3.5)$$

adică

$$M = 3 \cdot (4 - 1) - (2 + 2 + 2 + 2) = 1 - \text{caz general (fig. 3.14),}$$

respectiv

$$M = 3 \cdot (2 - 1) - 2 = 1 - \text{model MBS cu număr minim de corpuri (fig. 3.15),}$$

unde S reprezintă spațiul de mișcare al mecanismului, n_c – numărul de corpuri (inclusiv cel fix), $\sum r_g$ – suma restricțiilor geometrice introduse de cuple (în conformitate cu spațiul de mișcare).

Evident, doar una dintre cuplele de rotație dintre cadrul platformei și suportul de susținere este activă cinematic (luată în considerare).

În cazul **soluției derivate** din figura 3.2, care utilizează un mecanism patruleter ca amplificator de cursă pentru mișcarea diurnă, modelul MBS conține (fig. 3.16):

- corpul fix – suportul de susținere (0);
- corpuri mobile – cilindrul actuatorului (1), pistonul actuatorului (2), balansierul de intrare (3), biela (4), balansierul de ieșire - corp comun cu cadrul platformei (5).

Legăturile dintre elemente/corpuri sunt realizate prin cuple de rotație (A, C, D, E, F, G), respectiv cuplă de translație (B) între componentele actuatorului, rezultând (v. rel. 3.5):

$M = 3 \cdot (6 - 1) - (2 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2) = 1$ (rotația platformei pentru efectuarea mișcării diurne).

Pentru același subsistem, modelul MBS cu număr minim de corpuri conține (fig. 3.17):

- corp fix – suportul de susținere (0);

- corpurile mobile - balansierul de intrare (3) al mecanismului patrulater, balansierul de ieșire & cadrul platformei (5);
- restricții de distanță – lungime variabilă controlată cinematic ($d_{AC} = f(\text{timp})$), lungime constantă ($d_{EF} = l_4 = ct$).

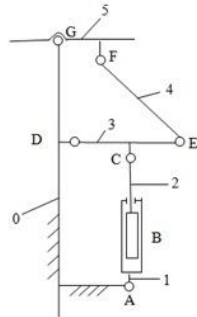


Figura 3.16. Modelul MBS al subsistemului pentru mișcarea diurnă – soluția derivată.

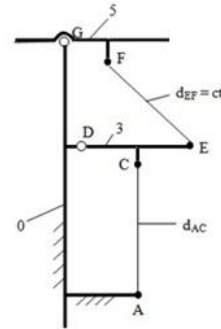


Figura 3.17. Modelul MBS cu număr minim de corpuri al subsistemului pentru mișcarea diurnă - soluția derivată.

Se obține:

$$M = 3 \cdot (3 - 1) - (2 + 1 + 2) = 1,$$

constrângerea de distanță constantă introducând o singură restricție, la care se adaugă câte două restricții introduse de cuplele de rotație din D și G.

În modelarea MBS a **subsistemului pentru mișcarea de elevație** se pleacă de la premiza că platforma (cadrul platformei) este elementul de referință (baza sistemului), fiind echivalent cu corpul fix.

Pentru **soluția de bază**, prezentată în subcap. 3.1 (v. fig. 3.1), ca și pentru soluțiile derivate (v. fig. 3.2, 3.3), mișcarea de elevație se transmite de la pistonul actuatorului la biela mecanismului paralelogram, care este articulată la balansierele montate fix pe ramele modulelor. În cazul general (fig. 3.18), modelul MBS conține, pe lângă corpul de referință – cadrul platformei (0), șase corpuri mobile: corpul de intrare – cilindrul actuatorului (1), corpul intermediar – pistonul actuatorului (2), biela (6), respectiv trei corpuri de ieșire - balansierele (3 - 5).

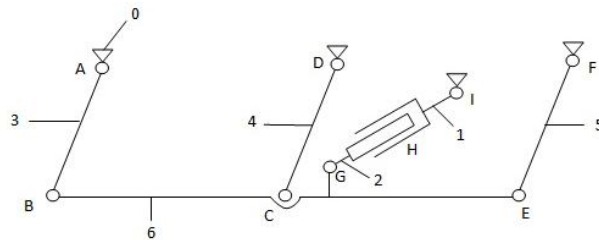


Figura 3.18. Modelul MBS al subsistemului pentru mișcarea de elevație.

Componenetele actuatorului sunt conectate la elementele adiacente (bielă, respectiv cadrul platformei) prin cuple de rotație (G, I), cupla dintre piston și cilindru fiind modelată prin cuplă de translație (H). Legăturile dintre balansiere și bielă, respectiv cadrul platformei, sunt modelate prin cuple de rotație (A – F).

Pentru cazul cu număr minim de corpuri (fig. 3.19), modelul MBS conține corpul de referință – reprezentat de cadrul platformei (0), și două corpuri mobile – bielă (6) și unul dintre balansiere/module (de ex. (3)). În acest caz, actuatorul liniar este modelat printr-o restricție de distanță variabilă între cadrul platformei și bielă, lungimea fiind controlată

(impusă) printr-o constrângere cinematică de tipul $d_{GI} = f(\text{timp})$. Deși balansierele 4 și 5 sunt corpuri de ieșire, se pot modela ca restricții de distanță constantă deoarece legea de mișcare a acestora este identică cu cea a balansierului (3).

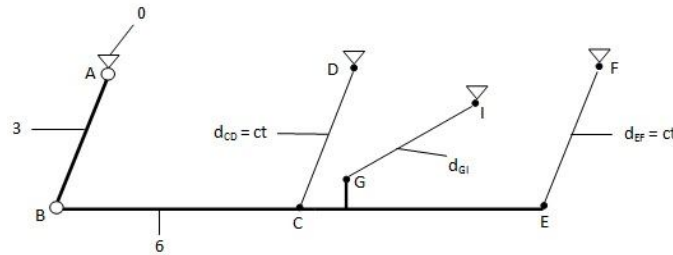


Figura 3.19. Modelul MBS cu număr minim de corpuri al subsistemului pentru mișcarea de elevație.

Ambele modele MBS ale subsistemului mișcării de elevație (v. fig. 3.18 & 3.19) dispun de un grad de mobilitate, corespunzător rotației balansierului/modulului relativ la cadrul platformei, după cum urmează:

$$M = 3 \cdot (6 - 1) - (2 + 2 + 2 + 2 + 2 + 2) = 1$$

pentru caz general – v. fig. 3.18 (trebuie menționat că, din punct de vedere cinematic, una dintre perechile 3 - AB, 4 - CD, 5 - EF este pasivă, deci nu se ia în considerare la calculul gradului de mobilitate),

respectiv

$$M = 3 \cdot (3 - 1) - (2 + 2 + 1) = 1,$$

pentru modelul cu număr minim de corpuri - v. fig. 3.19 (în acest caz, una dintre restricțiile de distanță constantă, d_{CD} sau d_{EF} , este pasivă cinematic).

Prin combinarea variantelor de modelare ca sistem multicorp ale subsistemelor de acționare & transmitere a mișcărilor (diurnă și elevație) se obțin o serie de modele MBS pentru mecanismul de orientare a platformei de șiruri PV. Evident, din punct de vedere al complexității, este de preferat modelul cu număr minim de corpuri. Astfel, pentru soluția de bază a mecanismului de orientare pseudo-azimutal (v. fig. 3.1), modelul MBS cu număr minim de corpuri este cel din figura 3.20, care se obține prin înserierea modelelor din figura 3.15 (subsistemul mișcării diurne) și respectiv figura 3.19 (subsistemul mișcării de elevație). Modelul conține corpul fix - suportul de susținere (0) și trei corpuri mobile, după cum urmează: cadrul platformei (1), balansierul/modulul (2) și biela (3). Modelul dispune de două grade de mobilitate, corespunzătoare mișcărilor diurnă (rotația platformei/cadrului relativ la suportul de susținere) și de elevație (rotația modulelor relativ la cadrul platformei).

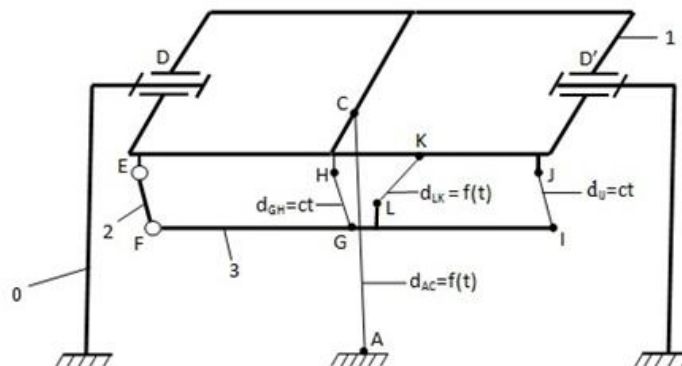


Figura 3.20. Modelul MBS cu număr minim de corpuri al mecanismului de orientare pseudo-azimutal.

Simularea în mediu virtual a comportamentului mecanismului de orientare pentru platforma de șiruri PV prin utilizarea pachetului software MBS ADAMS s-a efectuat într-o secvență de analiză bazată pe trei modele:

- modelul cinematic – conține corpurile din sistem, conectate prin cuple cinematice, și parametrii geometrici specifici mecanismului (locațiile cuplelor); intrarea se face utilizând restricții cinematice, prin care se controlează, de regulă, poziția sau viteza elementelor conducătoare (actuatoare liniare);
- modelul dinamic invers – include, pe lângă componentele modelului cinematic, forțele externe și interne care solicită sistemul (inclusiv forțele masico-inerțiale); modelul este utilizat pentru determinarea forțelor motoare (dezvoltate de actuatoare) care generează mișcarea prescrisă cinematic a mecanismului de orientare;
- modelul dinamic direct - integrează componentele modelului dinamic invers, dar acționarea se face prin forțele motoare anterior determinate; scopul este de a evalua mișcarea „reală” a sistemului de orientare, sub acțiunea forțelor.

Algoritmul de analiză descris a fost aplicat variantelor/soluțiilor de mecanisme de orientare prezentate în subcap. 3.1 (v. fig. 3.1 - 3.4), analiza/simularea fiind efectuată, după cum s-a precizat, cu programul ADAMS. 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 3.21. Acest model corespunde cazului general de modelare MBS, obținut prin cuplarea (integrarea) modelelor subsistemelor de acționare & transmitere a mișcărilor diurnă (v. fig. 3.14) și de elevație (v. fig. 3.18).

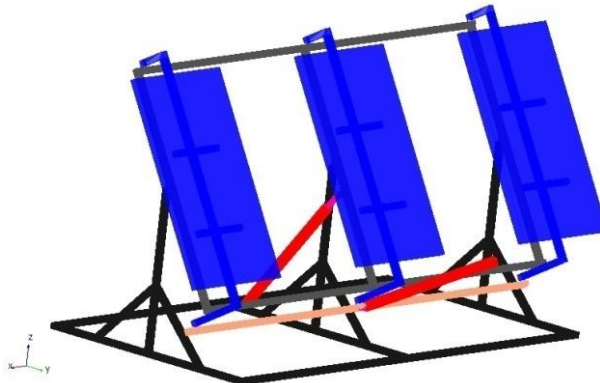


Figura 3.21. Modelul virtual al mecanismului de orientare pseudo-azimutal pentru platforma de șiruri PV (ADAMS).

În cazul modelului cinematic, legile de mișcare aplicate prin restricții cinematice în cuplele de translație dintre pistoanele și cilindrii actuatoarelor liniare au fost proiectate astfel încât să se asigure legile de variație dorite ale unghiului diurn (măsurat în cupla de rotație a cadrului platformei la suportul de susținere) și respectiv unghiului de elevație (măsurat în cupla de rotație a primului modul din șir la cadrul platformei), conform celor precizate în capitolul 2 al tezei. Astfel, domeniul unghiular pentru mișcarea diurnă este $\varepsilon^* \in [+60^\circ, -60^\circ]$, acționarea se face cu mișcare continuă, intervalul de simulare (timpul de operare) fiind de 15 ore. Pentru mișcarea de elevație, domeniul unghiular este $\rho^* \in [0^\circ, +60^\circ]$, care este parcurs cu mișcare continuă timp de 1 oră. În această simulare, pentru ambele mișcări, nu se ia în considerare cursa de revenire a sistemului în poziție inițială.

Diagramele de variație în timp pentru unghiurile diurn și de elevație sunt prezentate în figura 3.22, pentru care corespund legile de mișcare în actuatoare din figura 3.23. Totodată, se prezintă diagramele de variație pentru vitezele unghiulare ale platformei/modulelor (fig. 3.24), respectiv vitezele liniare echivalente în actuatoare (fig. 3.25).

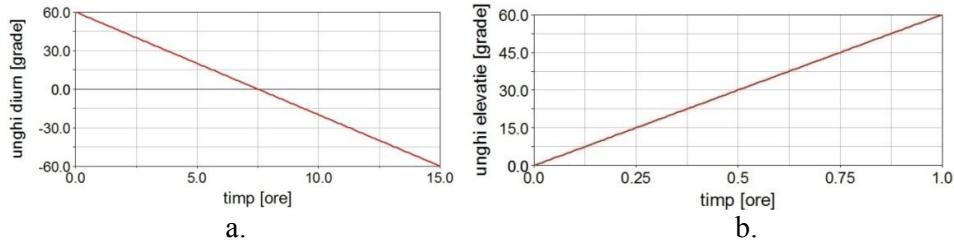


Figura 3.22. Legile de variație pentru unghiurile diurn (a) și de elevație (b).

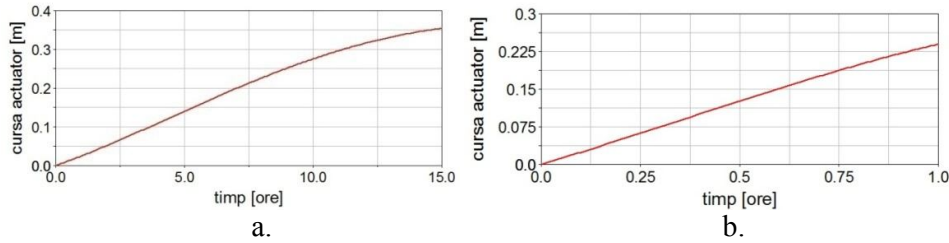


Figura 3.23. Cursa în actuatorul pentru mișcarea diurnă (a), respectiv de elevație (b).

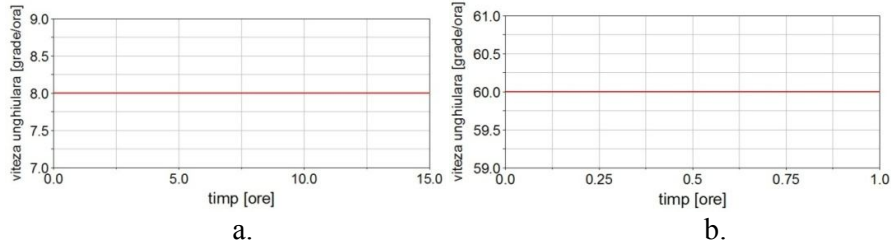


Figura 3.24. Viteza unghiulară diurnă (a), respectiv de elevație (b).

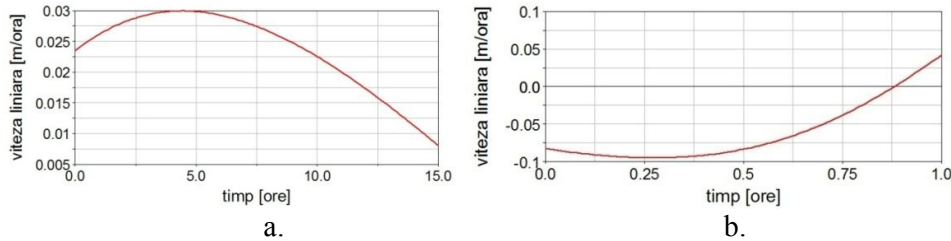


Figura 3.25. Viteza liniară în actuatorul pentru mișcarea diurnă (a), respectiv de elevație (b).

Analiza dinamică inversă a fost efectuată considerând încărcarea sistemului doar prin forțele masice și inerțiale, obținându-se diagramele de variație în timp ale forțelor motoare necesare pentru a asigura comportamentul prescris cinematic (fig. 3.26).

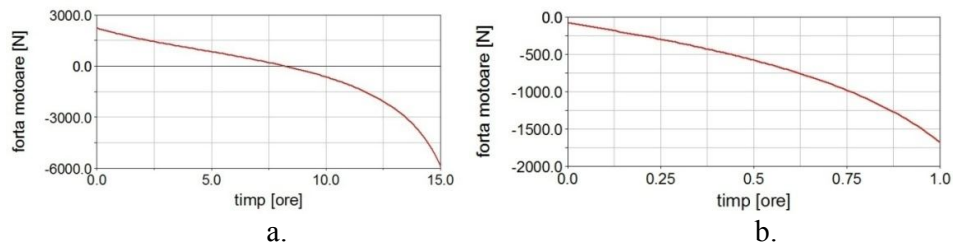


Figura 3.26. Forța motoare în actuatorul pentru mișcarea diurnă (a), respectiv de elevație (b).

În continuare, în vederea întocmirii modelului dinamic, restricțiile cinematice au fost înlocuite cu forțele motoare anterior determinate (aplicate între pistoanele și cilindrii

actuatoarelor). Funcțiile prin care se modelează forțele aplicate (fig. 3.27) apelează măsurile „forta_motoare_diurna” și „forta_motoare_elevatie” obținute prin analiza dinamică inversă, cu alte cuvinte ieșirea din analiza dinamică inversă devine intrare în analiza dinamică. Dintre rezultatele obținute prin analiza dinamică a mecanismului de orientare pseudo-azimutal, în figura 3.28 se prezintă diagramele de variație a puterilor consumate pentru realizarea legilor de mișcare diurnă și respectiv elevație (conform fig. 3.22 - 3.23).

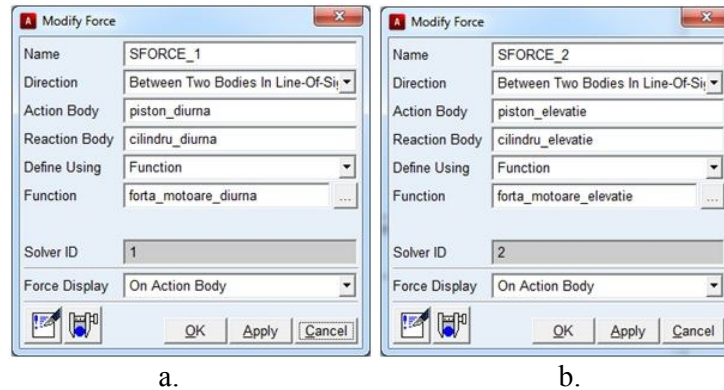


Figura 3.27. Caseta de editare a forței aplicate în actuatorul pentru mișcarea diurnă (a), respectiv de elevație (b).

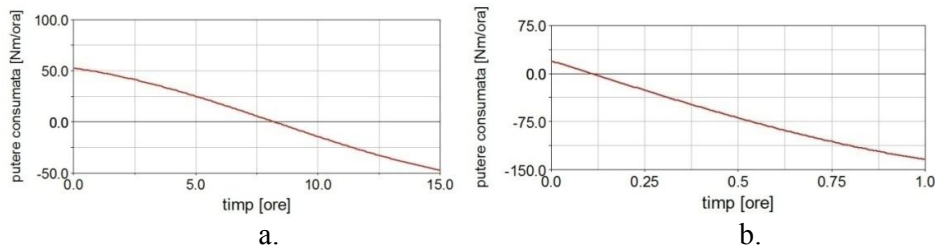


Figura 3.28. Puterea consumată pentru mișcarea diurnă (a), respectiv de elevație (b).

În capitolul 4 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 nestăționare (ex. acțiunea vântului).

3.3. OPTIMIZAREA MECANISMULUI DE ORIENTARE A PLATFORMEI DE ȘIRURI PV

Optimizarea modelului mecanic al sistemului de orientare, prin utilizarea mediului MBS ADAMS, a fost realizată prin parcurgerea următoarelor etape: parametrizarea modelului, definirea variabilelor de proiectare, definirea funcțiilor obiectiv de optimizat și a constrângerilor de proiectare, efectuarea studiilor de proiectare parametrică și proiectare de experimente pentru identificarea variabilelor de proiectare principale (cu influență semnificativă asupra comportamentului sistemului), optimizarea propriu-zisă a sistemului pe baza variabilelor principale. Pentru parametrizarea sistemelor de orientare s-au utilizat două modalități: parametrizarea prin intermediul punctelor care definesc schema structurală a mecanismului și respectiv parametrizarea prin utilizarea de expresii, care sunt utilizate pentru a defini relații între diverse obiecte din model (în sensul că expresia, care definește valoarea

unui parametru specific unui obiect, se modifică atunci când o valoare care intervine în expresie se schimbă). Prin parametrizare, în model se creează relații între obiecte, astfel încât atunci când se modifică un obiect, celelalte obiectele care depind de acesta sunt adaptate în mod automat.

În cazul sistemelor de orientare, minimizarea energiei consumate pentru realizarea orientării constituie obiectivul procesului de optimizare. Consumul de energie se poate obține prin integrarea curbelor de putere consumată pentru realizarea orientării, care depinde de forțele motoare generate de elementele de acționare (actuatoarele liniare) și de vitezele liniare specifice.

3.3.1. Optimizarea mecanismului destinat orientării diurne

Pentru **soluția de bază** a mecanismului de orientare (v. fig. 3.1), în lanțul cinematic al mișcării diurne, legea de mișcare aplicată prin restricția cinematică în cupla de translație dintre pistonul și cilindrul actuatorului a fost proiectată astfel încât să se asigure legea de variație a unghiului diurn, măsurat în cupla de rotație a cadrului platformei la suportul de susținere/fix (v. fig. 3.22, a & 3.23, a). În acest studiu (care vizează optimizarea sistemului din punct de vedere al locațiilor cuplelor), domeniul unghiular pentru mișcarea diurnă este $\varepsilon^* \in [+60^\circ, -60^\circ]$ (conform cap. 2), acționarea făcându-se cu mișcare continuă, timp de 15 ore (intervalul de simulare corespunde duratei zilei-lumină în ziua reprezentativă a sezonului “6” (care include solstițiul de vară), fără a se lua în considerare revenirea platformei la poziția inițială (fig. 3.29).

Mecanismul orientează o platformă PV, care conține un număr de 3 module (dispuse pe câte un rând/șir), suprafața totală a acestora fiind de 5,1 m². Întreaga structură mobilă (incluzând modulele și cadrul de susținere) are masa de 200 kg. Acționarea platformei se face prin intermediul unui actuator liniar, la care cilindrul este articulat de stâlpul de susținere fix, iar pistonul de cadrul platformei. Modelul virtual pentru structura mecanică a sistemului de orientare, realizat cu softul MBS ADAMS, este redat în figura 3.30, mișcarea sistemului realizându-se în conformitate cu diagrama prezentată în figura 3.29.

Parametrizarea modelului virtual al sistemului de orientare din figura 3.30, în vederea optimizării dispozitivului mecanic, se bazează pe utilizarea punctelor care definesc schema structurală a sistemului, în speță punctele prin care se definesc locațiile cuplelor dintre elemente/corpur. Pentru studiul de optimizare s-au considerat punctele de articulare a actuatorului de acționare la elementele adiacente, în speță articulația pistonului la cadrul platformei (punctul A), respectiv articulația cilindrului la stâlp (punctul B). Coordonatele articulațiilor cadrului/platformei la stâlpii de susținere (perechea D - D' - D'') se consideră stabilite exclusiv pe considerente constructive, nefiind luate în considerare în procesul de optimizare.

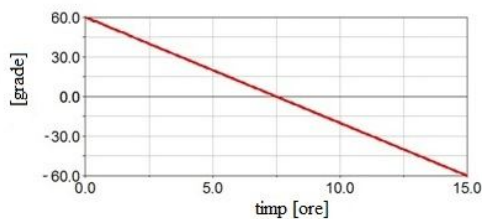


Figura 3.29. Diagrama de variație a unghiului diurn.

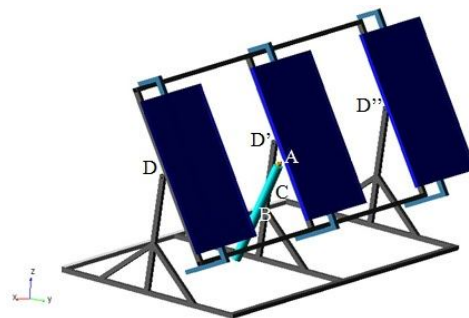


Figura 3.30. Modelul virtual al sistemului de orientare pentru mișcarea diurnă.

Plecând de la premiza ca actuatorul să fie dispus în planul transversal-vertical YZ, se obțin 4 **variabile de proiectare**, care vor controla modelul pe durata procesului de optimizare, după cum urmează: $DV_1 \rightarrow Y_A$, $DV_2 \rightarrow Z_A$, $DV_3 \rightarrow Y_B$, $DV_4 \rightarrow Z_B$ (fig. 3.31). Fiecare variabilă de proiectare este definită printr-o valoare inițială și un domeniu de variație relativ la valoarea inițială (± 50 mm), care a fost stabilit având în vedere menținerea sistemului în limite constructive acceptabile.

Pe de altă parte, s-a definit o **constrângere de proiectare** care controlează valoarea unghiului de presiune (β_p), măsurat între vectorul forței generate de actuator și vectorul vitezei liniare pe platforma în punctul A (fig. 3.32). Pentru siguranță în funcționare, valoarea maxim acceptată a unghiului de presiune este de 70° . În ADAMS, semnul măsurii prin care se definește o constrângere are o semnificație specială. De exemplu, dacă o constrângere este pozitivă, atunci este încălcată, respectiv dacă este negativă, nu a fost încălcată constrângerea. În aceste condiții, constrângerea de proiectare a fost definită printr-o măsură de tip funcție prin care se scade valoarea maxim acceptată din valoarea curentă a unghiului de presiune („limita_unghi_presiune = $70 - \text{unghi_presiune}$ ”).

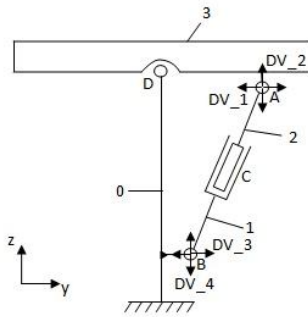


Figura 3.31. Variabilele de proiectare pentru optimizarea subsistemului mișcării diurne (soluția de bază).

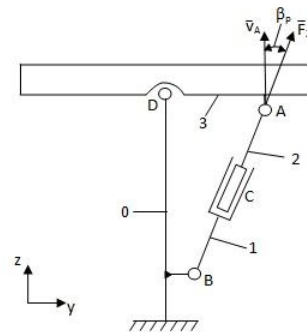


Figura 3.32. Unghiul de presiune în subsistemul mișcării diurne (soluția de bază).

Obiectivul optimizării dispozitivului mecanic constă din minimizarea forței motoare necesare pentru generarea traiectoriei impuse platformei PV (mișcarea diurnă), valoarea monitorizată în timpul simulării fiind rădăcina medie pătratică (RMS – Root Mean Square).

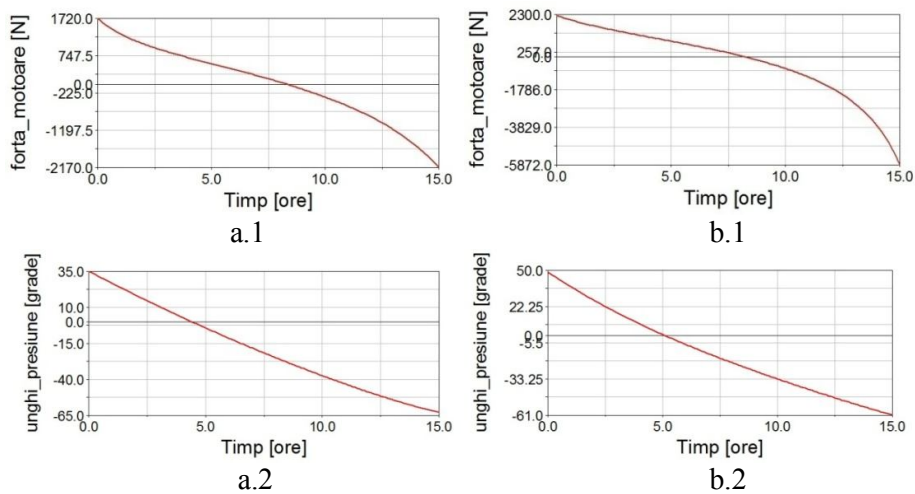


Figura 3.35. Diagramele de variație pentru forța motoare și unghiul de presiune: după optimizare (a), înainte de optimizare (b).

În urma procesului descris se obține configurația optimă a mecanismului de orientare (subsistemul mișcării diurne), pentru care în figura 3.35, a sunt redată diagramele de variație în timp pentru forța motoare și respectiv unghiul de presiune din mecanism. Pentru comparare, diagramele specifice mecanismului inițial (înainte de optimizare) sunt prezentate în figura 3.35, b. Valoarea monitorizată a funcției obiectiv (rădăcină medie pătrată), este 5833,77 N – în mecanismul inițial, respectiv 2171,18 N – în mecanismul optimizat.

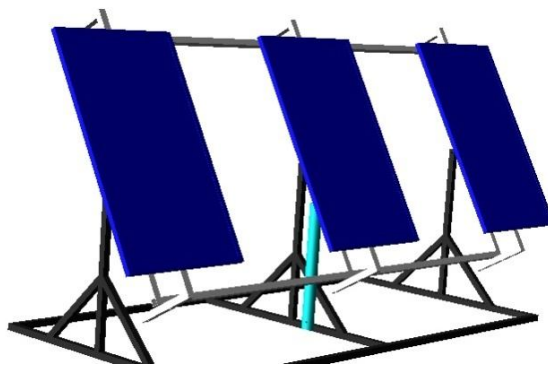


Figura 3.36. Modelul optimizat al sistemului de orientare pentru mișcarea diurnă.

Rezultatele obținute, care confirmă o reducere semnificativă a forței motoare (deci, a consumului energetic pentru orientare) cu modificări minore în configurația geometrică a mecanismului, demonstrează viabilitatea algoritmului de optimizare adoptat. Configurația optimă a mecanismului este prezentată în figura 3.36.

3.3.2. Optimizarea mecanismului destinat mișcării de elevație

Mișcarea de elevație (rotația modulelor relativ la cadrul platformei) este generată cu un actuator liniar, dispus între platformă și biela unui mecanism multi-paralelogram, care transmite mișcarea între modulele din șir (fiecare modul este conectat rigid/fix de câte un balansier al mecanismului paralelogram) (fig. 3.37). În acest studiu (care vizează optimizarea sistemului din punct de vedere al dispunerii actuatorului), domeniul unghiular pentru mișcarea de elevație este $\rho^* \in [0^\circ, +60^\circ]$ (stabilit în capitolul 2), acționarea făcându-se cu mișcare continuă timp de 1 oră (fig. 3.38). Din punct de vedere al poziției diurne, platforma este blocată (menținută fixă) în poziția de amiază ($\varepsilon^* = 0^\circ$), prin urmare cadrul platformei este elementul de referință (bază) al mecanismului destinat mișcării de elevație.

Parametrizarea modelului virtual al sistemului de orientare din figura 3.37 se bazează pe utilizarea punctelor care definesc schema structurală a sistemului, în speță locațiile cuplelor dintre elemente/corpurii. Pentru studiul de optimizare specific subsistemului mișcării de elevație s-au considerat punctele de articulare a actuatorului liniar la elementele adiacente, și anume articulația pistonului la bielă (punctul G), respectiv articulația cilindrului la platformă (punctul E). Coordonatele articulațiilor balansierelor (ramelor modulelor) la cadrul platformei (perechile H-H') și respectiv la bielă (punctele I, J, K) se consideră stabilite exclusiv pe considerente constructive, nefiind luate în considerare în procesul de optimizare.

Plecând de la premiza ca actuatorul să fie dispus în planul longitudinal-vertical XZ, se obțin 4 **variabile de proiectare**, care vor controla modelul pe durata procesului de optimizare, după cum urmează (fig. 3.39): $DV_1 \rightarrow X_E$, $DV_2 \rightarrow Z_E$, $DV_3 \rightarrow X_G$, $DV_4 \rightarrow Z_G$. Fiecare variabilă de proiectare este definită printr-o valoare inițială și un domeniu de variație relativ la valoarea inițială (± 50 mm), care a fost stabilit având în vedere menținerea sistemului în limite constructive acceptabile.

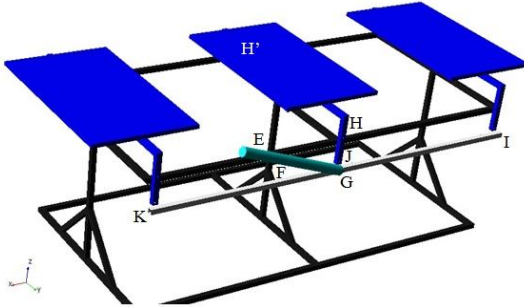


Figura 3.37. Modelul virtual al sistemului de orientare pentru mișcarea de elevație.

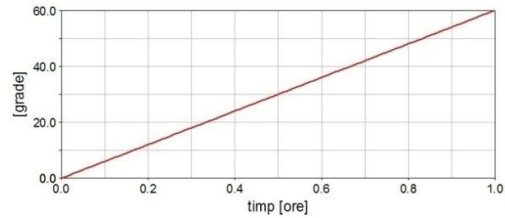


Figura 3.38. Diagrama de variație a unghiului de elevație.

Pe de altă parte, s-a definit o **constrângere de proiectare** care controlează valoarea unghiului de presiune, măsurat între vectorul forței generate de actuator și vectorul vitezei liniare pe balansier, transpus în punctul G (fig. 3.40). Pentru siguranță în funcționare, valoarea maxim acceptată a unghiului de presiune este de 70° , modelare fiind similară cu cea din subcapitolul 3.3.1.

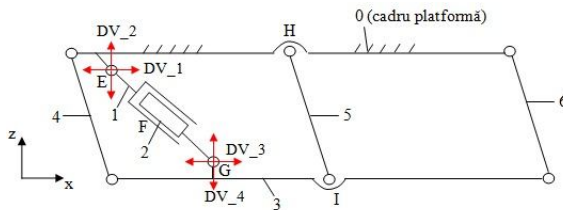


Figura 3.39. Variabilele de proiectare pentru optimizarea subsistemului mișcării de elevație.

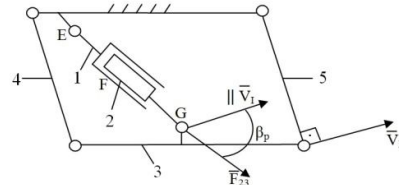


Figura 3.40. Unghiul de presiune în subsistemul mișcării de elevație.

Obiectivul optimizării constă din minimizarea forței motoare necesare pentru generarea mișcării de elevație impuse (v. fig. 3.38), valoarea monitorizată în timpul simulării fiind rădăcina medie pătratică (RMS - Root Mean Square).

În urma optimizării, se obțin diagramele de variație a forței motoare și respectiv unghiului de presiune din figura 3.43, a. Pentru comparare, în figura 3.43, b sunt prezentate diagramele/rezultatele specifice mecanismului inițial (înainte de optimizare).

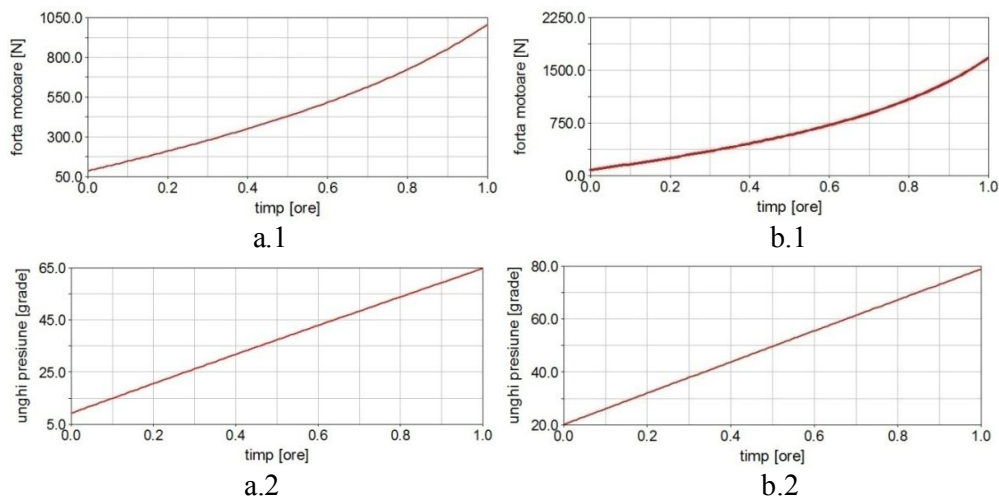


Figura 3.43. Diagramele de variație pentru forța motoare și unghiul de presiune în subsistemul mișcării de elevație: după optimizare (a), înainte de optimizare (b).

Se observă o reducere semnificativă a forței motoare (deci, a consumului energetic pentru orientare), cu modificări minore în configurația geometrică a mecanismului. Valoarea monitorizată a funcției obiectiv (rădăcina medie pătrată) este 800.7 N – în mecanismul inițial, respectiv 534.51 N – în sistemul optimizat, ceea ce demonstrează viabilitatea algoritmului de optimizare adoptat. Configurația optimă a mecanismului este prezentată în figura 3.44.

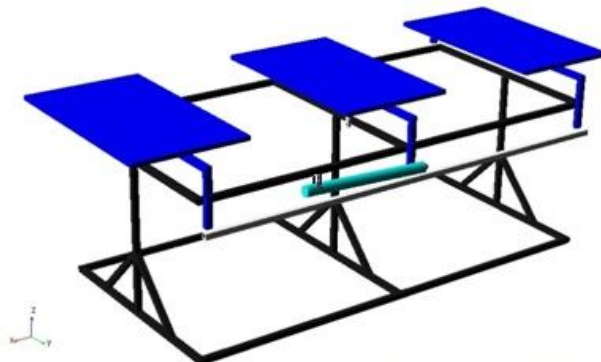


Figura 3.44. Modelul optimizat al mecanismului de orientare pentru mișcarea de elevație.

Pentru a obține rezultate mai apropiate de realitate, studiul continuă în capitolul 4 al tezei de doctorat cu dezvoltarea – modelarea sistemului de control al mecanismului de orientare, în concept mecatronic, prin integrarea sistemului de control cu dispozitivul mecanic, la nivelul prototipului virtual.

3.4. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

- Pe baza celor prezentate se desprind următoarele **concluzii**:
- soluția optimă a mecanismului de orientare pentru sistemul PV este: un mecanism de orientare pseudo-azimutal bi-axial, acționat de două actuatore liniare, cu transmiterea mișcării între module/șiruri printr-un mecanism multi-paralelogram;
 - sistemul de orientare propus este de tip modular, permițând montarea de module cu diverse dimensiuni;
 - factorul extern principal este vântul, prin situațiile de încărcare pe suprafața modulului obținându-se următoarele momente maxime generate de acțiunea vântului: 19,69 Nm – pentru încărcare pe lungimea modulului, respectiv 11,58 Nm – pentru încărcare pe lățimea modulului;
 - modelarea & simularea în mediu virtual precede realizarea - implementarea prototipului fizic, vizând evaluarea comportamentului cinematico-dinamic al mecanismului de orientare;
 - studiul de optimizare conduce la o reducere substanțială a forțelor motoare, cu modificări minore în configurația geometrică a mecanismului, ceea ce are efect benefic asupra eficienței energetice a sistemului (prin consumul de energie necesar orientării).

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

- conceperea soluției optime a sistemului de orientare pseudo-azimutal bi-axial;
- conceperea a trei variante de mecanisme de orientare derivate din soluția de bază: mecanism de orientare bi-axial cu amplificator de cursă pentru mișcarea diurnă de tip patrulater; mecanism de orientare bi-axial cu amplificator de cursă pentru mișcarea diurnă de tip conic; mecanism de orientare bi-axial cu singură sursă motoare (cea a mișcării diurne) pentru generarea ambelor mișcări (diurnă și elevație);

- modelarea solidă a mecanismelor de orientare în mediu CAD;
- modelarea ca sistem multicorp a mecanismului de orientare (separat pe subsisteme și în ansamblu);
- determinarea momentelor de încărcare determinate de acțiunea vântului;
- conceperea modelelor pentru analiza în mediul virtual a mecanismului de orientare (model cinematic, model dinamic invers, model dinamic);
- modelarea variabilelor de proiectare, funcției obiectiv și constrângerilor de proiectare;
- optimizarea subsistemelor de transmitere a mișcărilor pentru orientarea diurnă și de elevație.

4. PROTOTIPAREA VIRTUALĂ A SISTEMULUI DE ORIENTARE A PLATFORMEI DE ȘIRURI PV

4.1. ASPECTE PRIVIND CONTROLUL SISTEMELOR DE ORIENTARE

După cum s-a precizat în capitolul 1 (v. fig. 1.14), controlul sistemelor de orientare poate fi realizat în circuit închis (cu fotosenzori), sau în circuit deschis (prin algoritmi predefiniți de orientare bazați pe date astronomice din sistemul Soare-Pământ). Orientarea bazată pe fotosenzori poate introduce erori în detectarea poziției reale a Soarelui pe bolta cerească în condiții atmosferice variabile. Sistemele în circuit deschis elimină acest dezavantaj, poziția Soarelui putând fi determinată cu precizie pentru orice zonă geografică. În aceste condiții, pentru lucrarea de față s-a preferat utilizarea unui sistem de control în circuit deschis, care este bazat pe parametri predefiniți de control pentru motoare (în funcție de poziția Soarelui pe bolta cerească). Proiectarea optimală a legii de control (cu orientare în pași) pentru sistemul de orientare pseudo-azimutal (controlul mișcărilor diurnă și de elevație) este abordată în detaliu în subcapitolul 4.4, ținând seama și de cele prezentate în capitolul 2. Pentru proiectarea sistemului de control (v. subcap. 4.2 & 4.3) se va considera doar o secvență din legea de orientare, corespunzătoare unui singur pas de mișcare, urmând ca ulterior să se facă verificarea pentru întreaga lege (întregul domeniu unghiular).

4.2. MODELAREA SISTEMULUI DE CONTROL AL MECANISMULUI DE ORIENTARE PSEUDO-AZIMUTAL

Problema integrării sistemului de control în modelul mecanic MBS al sistemului de orientare a fost abordată prin utilizarea modului ADAMS/Controls din pachetul MBS ADAMS și a softului specializat DFC EASY5 (Engineering Analysis Systems). ADAMS/Controls este un plug-in apelabil din interfața de preprocesare ADAMS/View, care permite conectarea modelului MBS dezvoltat în ADAMS/View cu scheme bloc de control concepute cu softuri specializate DFC (precum EASY5 sau MATLAB/Simulink).

Pentru lucrarea de față s-a optat pentru schemă de control mono-bucă (atât pentru mișcarea diurnă, cât și pentru elevație), parametrul monitorizat/controlat fiind unghiul diurn, respectiv unghiul de elevație al platformei/modulelor PV.

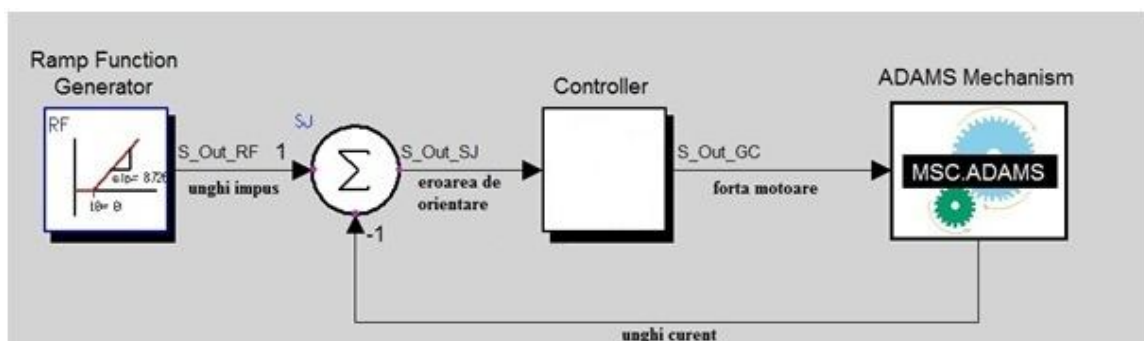


Figura 4.3. Schema generală de control mono-bucă.

În aceste condiții, schema generală de control proiectată în EASY5 este prezentată în figura 4.3, blocurile care intervin în această schemă având următoarele semnificații:

- RF (Ramp Function Generator) – generator de funcție de tip rampă, utilizat pentru modelarea semnalului de intrare (unghiul impus, după caz diurn sau de elevație);

- SJ (Summing Junction) – bloc de însumare/extragere, utilizat pentru compararea unghiului impus (“+1”) cu unghiul măsurat/curent (“-1”);
- GC (General Controller) – bloc utilizat pentru modelarea controlerului (regulatorului), urmând a se testa mai multe variante de controlere din familia PID (Proportional-Integral-Derivativ);
- ADAMS Mechanism – blocul de interfață ADAMS, care integrează modelul MBS al mecanismului de orientare (dispozitivul mecanic) conceput în ADAMS.

Semnalul de intrare tip rampă corespunde unui pas de mișcare de 30° , care se execută în 60 sec., ceea ce înseamnă o funcție de forma “ $0,0087222 \cdot \text{timp}$ ” (în radiani). Prin blocul de însumare, unghiul impus se compară cu unghiul realizat de sistem, ieșirea din acest bloc fiind, de fapt, eroarea de orientare. Aceasta constituie intrare în controler, care generează forța motoare pentru modelul mecanic MBS dezvoltat în ADAMS.

Pentru a asigura comunicația dintre modelul mecanic (ADAMS) și sistemul de control (EASY5) s-au definit variabilele de intrare & ieșire, și respectiv funcțiile prin care aceste variabile sunt apelate (fig. 4.4).

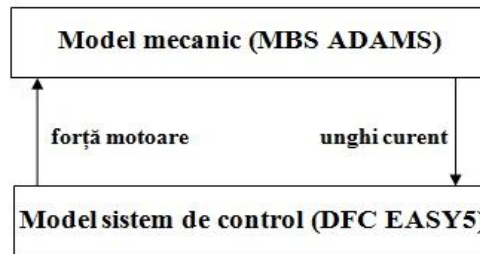


Figura 4.4. Schema comunicațiilor în sistemul mecatronic.

Din punct de vedere al elementului de control, s-au testat o serie de variante din familia PID (Proportional-Integral-Derivativ), cu scopul de a identifica cea mai simplă variantă de controler care asigură un comportament corespunzător al sistemului (în termeni de stabilitate și robustețe). Pe lângă controlerul general PID, s-au testat următoarele variante derivate: controler PI (Proportional-Integral), controler PD (Proportional-Derivativ) și controler P (Proportional).

Familia PID conține controlere cu structură fixă, care permit obținerea obiectivelor impuse prin modificarea parametrilor funcției de transfer. Ca avantaje ale acestor controlere se pot menționa: realizare practică ușoară, ceea ce conduce la un preț scăzut; acordare facilă (în practică se utilizează, de regulă, metode empirice de acordare, bazate pe măsurători); soluționarea unor obiective variate referitoare la eroarea staționară, valoarea suprareglajului, valoarea timpului de creștere ș.a.

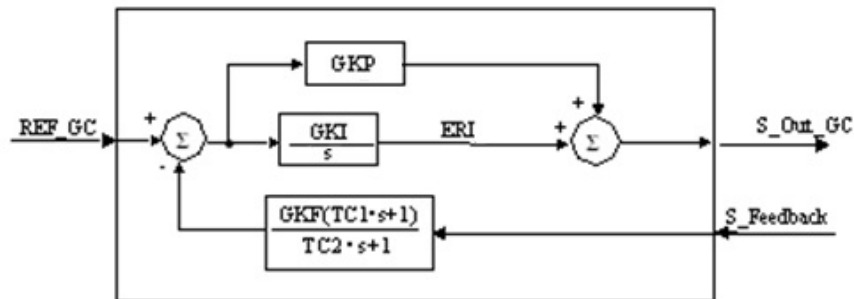


Figura 4.12. Schema controlerului PID în EASY5 [90].

Schema controlerului general PID în EASY5 este prezentată în figura 4.12, parametrii care intervin având următoarea semnificație (s-au folosit notațiile din EASY5): REF_GC - intrarea în controler (concret, eroarea de orientare, adică ieșirea din blocul de comparare SJ – S_Out_SJ, v. fig. 4.3); S_Feedback - semnalul de feedback; GKP - factorul de amplificare (proporțional); GKF - factorul de amplificare pe linia de feedback; GKI - factorul integral (timp de integrare); TC1 - factorul derivativ (timp de derivare - utilizat pentru a calcula derivata aproximativă din semnalul de eroare); TC2 – constanta de timp de amortizare a feedback-ului (utilizată pentru a preveni un contur implicit); S_Out_GC – ieșirea din controler (concret, forța motoare transmisă la modelul mecanic MBS); s - transformata Laplace.

În cele care urmează va fi discutată problema acordării controlerului PID, algoritmul prezentat putând fi adaptat pentru situațiile particulare ale controlerelor derivate (PI, PD și P). Scopul acordării controlerului este de a determina valorile optime ale factorilor specifici care intervin în ecuațiile funcțiilor de transfer, și anume, după caz, factorul proporțional (GKP), factorul integral (GKI) și timpul de derivare (TC1), astfel încât să se obțină indicii de performanță impuși (stabilitate, robustețe).

4.3. OPTIMIZAREA SISTEMULUI DE CONTROL (CONTROLERULUI)

Acordarea controlerului PID poate fi realizată prin diferite metode specifice teoriei sistemelor automate, care includ metoda locului rădăcinilor, metode frecvențiale ș.a. În lucrarea de față, acordarea controlerului este privită ca o problemă de proiectare optimă, procedura de optimizare fiind similară cu cea folosită în subcapitolul 3.3 pentru optimizarea modelului mecanic MBS al sistemului de orientare.

- Datele specifice procesului de optimizare a sistemului de control (controlerului) sunt:
- variabilele de proiectare - factorii de acordare a controlerului (după caz, PID, PI, PD, P);
 - funcția obiectiv - eroarea de orientare, ca diferență între unghiul diurn/elevație impus și valoarea curentă măsurată;
 - valoarea monitorizată a funcției obiectiv - rădăcina medie pătrată (RMS) pe durata simulării;
 - scopul optimizării - minimizarea valorii monitorizate a funcției obiectiv.

În cele ce urmează, se va detalia **algoritmul de optimizare pentru sistemul de control cu controler PID**, a cărui diagramă bloc este prezentată în figura 4.13, procedura fiind similară și pentru celelalte tipuri de controlere investigate.

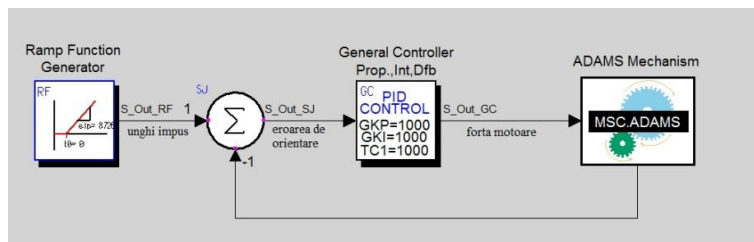


Figura 4.13. Diagrama bloc a sistemului de control cu controler PID.

Pentru a avea acces la procedura de optimizare parametrică inclusă în softul ADAMS este necesar ca sistemul de control din figura 4.13 să fie transferat în ADAMS. Pentru aceasta, modelul este exportat din interfața EASY5 (fig. 4.14) prin formatul ESL (External System Library), specificându-se totodată parametrii sistemului care ulterior vor fi identificați în ADAMS ca variabile de proiectare (în cazul de față, factorii GKP, GKI și TC1).

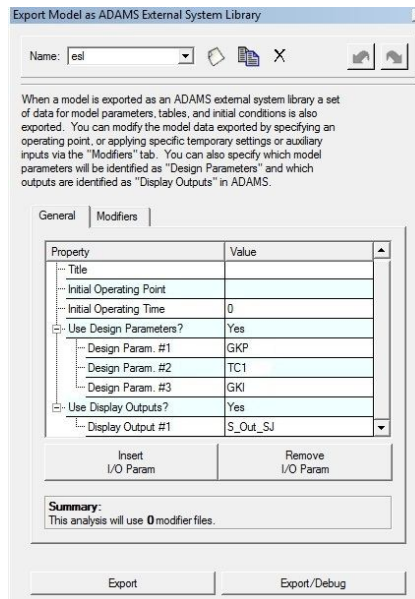


Figura 4.14. Fereastra de export a sistemului de control din EASY5.

În aceste condiții, problema de optimizare a sistemului de control este una mono-obiectiv, fără constrângeri de proiectare. Algoritmul de optimizare este cel utilizat și la proiectarea optimă a dispozitivului mecanic (v. subcap. 3.3), și anume OPTDES-GRG - metoda de diferențiere „Forward”.

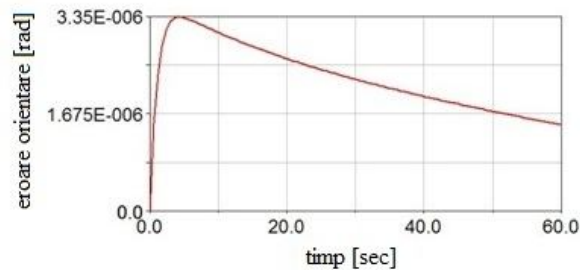


Figura 4.19. Eroarea de orientare la mișcarea diurnă – controler PID.

În cazul sistemului de control pentru mișcarea diurnă, ca rezultat al procesului de optimizare, s-au obținut valorile optime ale factorilor controlerului PID, și anume: $GKP = 4,73 \cdot 10^8$, $GKI = 1$, $TC1 = 5,23 \cdot 10^8$. Cu aceste valori, diagrama de variație în timp a erorii de orientare este prezentată în figura 4.19, rădăcina medie pătrată fiind foarte mică, $RMS_e = 1,48 \cdot 10^{-6}$, ceea ce demonstrează viabilitatea procesului de optimizare adoptat.

Din analiza rezultatelor obținute, se constată că toate tipurile de controler investigate (PID, PI, PD, P) asigură un comportament corespunzător al sistemului de orientare pentru mișcarea diurnă (erori de orientare foarte mici, de ordinul 10^{-6}). În aceste condiții, se reține ca optimă varianta cea mai simplă/ieftină, și anume controlerul de tip proporțional (P).

În secțiunea următoare a lucrării (subcap. 4.4), destinată proiectării optimale a legii de mișcare, se va verifica stabilitatea/performața sistemului de control pentru o lege de orientare în pași completă (pe întreg domeniul unghiular de mișcare).

În continuare, se verifică **robustețea sistemului de control** mono-buclă cu controler proporțional. Robustețea reprezintă capacitatea sistemului 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. În cazul de față, se verifică robustețea sistemului de control pentru mișcarea diurnă la apariția unei perturbații externe netaționare reprezentată de acțiunea vântului.

În funcție de distribuția presiunii exercitate de vânt asupra modulelor fotovoltaice, în subcapitolul 3.2.1 s-au determinat tipurile de încărcare (uniformă, respectiv neuniformă), stabilindu-se forța generată de acțiunea vântului și respectiv momentul de încărcare pe un modul PV. Pentru platforma în studiu, cu suprafața $S = 5,1 \text{ m}^2$ (trei module PV cu dimensiunile $1,7 \times 1 \text{ m}$), considerând o rafală de vânt cu viteza $v = 15 \text{ m/s}$, se obține un moment de încărcare maxim de aprox. 60 Nm , care va fi aplicat în modelul virtual al sistemului de orientare la nivelul cuplei de rotație dintre cadrul platformei și suportul de susținere fix. Se consideră că rafala de vânt, având un profil trapezoidal, acționează timp de 15 secunde, simetric față de mijlocul intervalului de 60 secunde în care se efectuează un pas de mișcare diurnă, conform diagramei din figura 4.24.

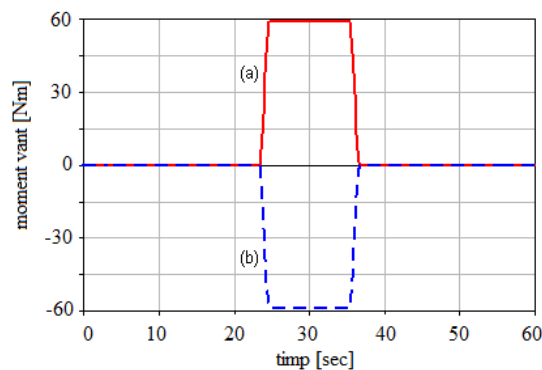


Figura 4.24. Variația momentului de încărcare generat de vânt.

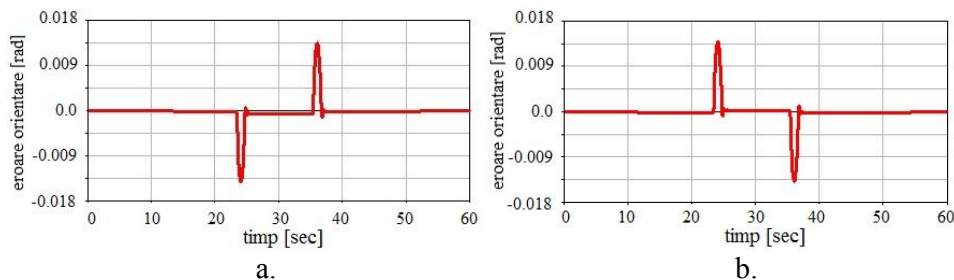


Figura 4.25. Eroarea de orientare la acțiunea vântului în sens motor (a) sau rezistent (b).

Pentru ambele situații de încărcare (moment pozitiv sau negativ), s-au determinat erorile de orientare, cu scopul de a evalua robustețea sistemului de control, rezultatele fiind prezentate în figura 4.25. La începutul și sfârșitul acțiunii vântului apar anumite erori, totuși foarte mici, iar ulterior sistemul se stabilizează corespunzător, ceea ce demonstrează robustețea sistemului de control, care este capabil să compenseze efectul perturbațiilor externe netaționare.

4.4. PROIECTAREA OPTIMALĂ A LEGII DE MIȘCARE

În cadrul acestei secțiuni se dezvoltă un algoritm de proiectare optimală a legii de mișcare (control) pentru sistemul de orientare pseudo-azimutal, în vederea creșterii eficienței energetice a sistemului (prin maximizarea aportului de radiație solară incidentă și minimizarea

consumului de energie necesar orientării). Studiul se derulează prin utilizarea prototipului virtual al sistemului de orientare (dezvoltat în subcap. 4.2), care integrează modelul mecanic MBS (ADAMS) și sistemul de control mono-bucă cu controler proporțional (EASY5). Mecanismul orientează o platformă PV, care conține 3 module dispuse în șir, suprafața activă fiind de 5,1 m².

În cazul general, legea de mișcare pas-cu-pas este definită de următorii parametri (variabile de proiectare): domeniul mișcării unghiulare, numărul de pași, dimensiunea pașilor și timpii de acționare (când pașii de mișcare sunt realizați). Între variabilele de proiectare menționate există unele corelații, de exemplu suma dimensiunilor pașilor este egală cu amplitudinea domeniului unghiular de mișcare. Prin corelarea optimă a acestor date, se poate obține o lege de mișcare pas-cu-pas apropiată ca eficiență de cazul ideal al orientării continue.

Deoarece curbele de radiație directă și incidentă sunt simetrice relativ la poziția de amiază (v. fig. 2.10), legea de mișcare va fi, de asemenea, simetrică (de exemplu, în cazul legii de mișcare diurnă, cu valori pozitive ale unghiului diurn dimineața și valori negative după-amiază). În aceste condiții, se simplifică procesul de proiectare optimă a legii de mișcare, întrucât se va lua în considerare doar jumătate de lege (de la răsărit la amiază), care este ulterior transpusă pentru orientarea de la amiază la apus (la mișcarea diurnă, prin inversarea semnului unghiului).

Pentru simplificare, a fost considerată aceeași durată pentru toți pașii de mișcare, indiferent de dimensiunea acestora. Astfel, s-au obținut legile de mișcare de la răsărit (t_r) până la amiază (t_n), după cum urmează:

- *mișcarea diurnă* (fig. 4.26):

$$STEP (time, (t_r + t_{d1}), \varepsilon_0, (t_r + t_{d1} + \Delta t), \varepsilon_0 - \Delta\varepsilon_1) + STEP (time, (t_r + t_{d1} + t_{d2}), 0, (t_r + t_{d1} + t_{d2} + \Delta t), -\Delta\varepsilon_2) + \dots + STEP (time, (t_r + t_{d1} + t_{d2} + \dots + t_{dk}), 0, (t_r + t_{d1} + t_{d2} + \dots + t_{dk} + \Delta t), -\Delta\varepsilon_k), \quad (4.7)$$

unde: t_{d1} - timpul la care începe primul pas de mișcare, relativ la t_r ; t_{d2} - timpul la care începe al doilea pas, relativ la începutul primului pas; t_{dk} - timpul la care începe ultimul pas, relativ la începutul pasului anterior; Δt - durata pașilor de mișcare; ε_0 - valoarea inițială a unghiului diurn (ε^*); $\Delta\varepsilon_1$ - dimensiunea primului pas; $\Delta\varepsilon_2$ - dimensiunea celui de-al doilea pas; $\Delta\varepsilon_k$ - dimensiunea ultimului pas;

- *mișcarea de elevație* (fig. 4.27):

$$STEP (time, (t_r + t_{e1}), \rho_0, (t_r + t_{e1} + \Delta t), \rho_0 + \Delta\rho_1) + STEP (time, (t_r + t_{e1} + t_{e2}), 0, (t_r + t_{e1} + t_{e2} + \Delta t), \Delta\rho_2) + \dots + STEP (time, (t_r + t_{e1} + t_{e2} + \dots + t_{ek}), 0, (t_r + t_{e1} + t_{e2} + \dots + t_{ek} + \Delta t), \Delta\rho_k), \quad (4.8)$$

semnificația parametrilor care intervin fiind similară cu cea de la mișcarea diurnă, de exemplu ρ_0 este valoarea inițială a unghiului de elevație (ρ^*) ș.a.m.d.

În procesul de optimizare, pentru legea de mișcare diurnă au fost considerate ca variabile de proiectare doar momentele de acționare (efectuare) a pașilor de mișcare, care sunt definite de următorii parametri: t_{d1} , t_{d2} , ..., t_{dk} . Ceilalți parametri care intervin în legea de mișcare (4.7) au fost definiți după cum urmează: valoarea inițială a unghiului diurn a fost stabilită în conformitate cu domeniul optim determinat în capitolul 2 ($\varepsilon^* \in [+60^\circ, -60^\circ]$), rezultând $\varepsilon_0 = 60^\circ$; numărul de pași de mișcare de la răsărit până la amiază a fost modificat manual, prin luarea în considerare succesiv a valorilor $k_d = 1, 2, 3, 4, 5, 6$; toți pașii de mișcare au aceeași dimensiune ($\Delta\varepsilon_1 = \Delta\varepsilon_2 = \dots = \Delta\varepsilon_k$), care se stabilește în funcție cu numărul de pași k_d , adică $\Delta\varepsilon = \varepsilon_0 / k_d$; durata unui pas de mișcare este $\Delta t = 60$ secunde.

Pentru legea de mișcare elevatorie au fost considerate ca variabile de proiectare valoarea inițială a unghiului de elevație (ρ_0), dimensiunea pașilor de mișcare ($\Delta\rho_1, \Delta\rho_2, \dots, \Delta\rho_k$) și momentele de acționare (efectuare) a pașilor ($t_{e1}, t_{e2}, \dots, t_{ek}$). Ceilalți parametri care intervin în legea de mișcare (4.8) au fost stabiliți după cum urmează: numărul de pași de mișcare de la răsărit până la amiază a fost modificat manual, prin luarea în considerare succesiv a valorilor $k_e = 1, 2$; durata unui pas este $\Delta t = 60$ secunde.

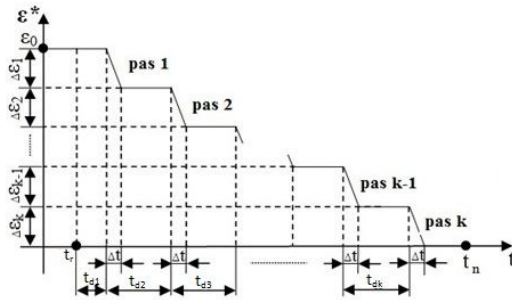


Figura. 4.26. Configurația legii de mișcare pas-cu-pas pentru orientarea diurnă.

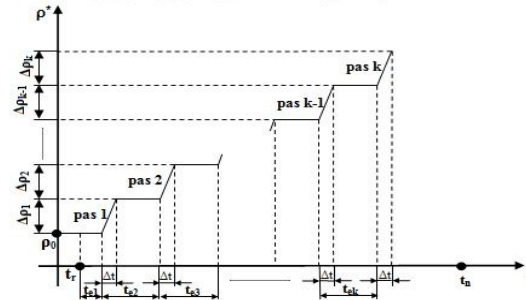


Figura. 4.27. Configurația legii de mișcare pas-cu-pas pentru elevație.

În procesul de optimizare se iau în considerare simultan ambele legi de mișcare (diurnă și elevație). Având în vedere numărul de pași considerați pentru mișcarea diurnă ($k_d = 1, 2, 3, 4, 5, 6$), respectiv în cazul elevației ($k_e = 1, 2$), prin combinarea acestor valori s-au obținut 12 variante/perechi ($k_d = 1, k_e = 1$; $k_d = 1, k_e = 2$ ș.a.m.d), pentru fiecare dintre acestea urmând a se efectua câte un studiu de optimizare.

După cum s-a menționat, scopul procesului de optimizare a legilor de mișcare (orientare) este de a maximiza eficiența energetică a sistemului fotovoltaic, care este exprimată prin următoarea funcție obiectiv (F):

$$F = E_T - (E_F + E_C), \quad (4.9)$$

în care E_T este cantitatea de energie produsă de sistemul fotovoltaic cu orientare, E_F - energia produsă de sistemul echivalent fix (fără orientare), E_C - energia consumată pentru realizarea orientării (cumulează consumul pentru mișcarea diurnă și mișcarea de elevație).

Algoritmul de optimizare prezentat a fost aplicat în vederea determinării legilor de mișcare pentru zilele reprezentative din cele 12 luni (v. tabelul 2.1), în continuare prezentându-se rezultate obținute pentru zilele reprezentative ale lunilor August ($N = 229, t_r = 5.10$) și Septembrie ($N = 259, t_r = 5.88$). De exemplu, în tabelele 4.1 și 4.2 sunt indicate valorile optime ale variabilelor de proiectare pentru lege de mișcare diurnă cu $k_d = 1 \rightarrow 6$ pași și lege de elevație cu $k_e = 1$ pas. Astfel de rezultate au fost obținute și pentru celelalte perechi/combinatii de valori ($k_d - k_e$) privitoare la numărul de pași.

Tabelul 4.1. Valorile optime ale variabilelor de proiectare ($N = 229, k_d = 1 \rightarrow 6, k_e = 1$).

k_d	t_{d1}	t_{d2}	t_{d3}	t_{d4}	t_{d5}	t_{d6}	t_{e1}	$\Delta\rho_1$	ρ_0
1 pas	5.083	-	-	-	-	-	2.775	29.504	-2.144
2 pași	3.414	2.750	-	-	-	-	2.787	31.367	-3.932
3 pași	3.545	1.52	1.114	-	-	-	2.194	47.747	-12.32
4 pași	3	1.4	1	1	-	-	3	36.389	-5.873
5 pași	2.4	1	1	1	0.997	-	2.076	49.838	-13.50
6 pași	1.4	1	1	1	1	0.997	1.39	61.028	-20.0

Tabelul 4.2. Valorile optime ale variabilelor de proiectare ($N = 259, k_d = 1 \rightarrow 6, k_e = 1$).

k_d	t_{d1}	t_{d2}	t_{d3}	t_{d4}	t_{d5}	t_{d6}	t_{e1}	$\Delta\rho_1$	ρ_0
1 pas	4.709	-	-	-	-	-	1.831	26.4	2.988
2 pași	4.102	1.374	-	-	-	-	2.301	15.49	10.12
3 pași	3.580	1.013	1.013	-	-	-	1.703	30.975	1.17
4 pași	2.518	1.095	1.005	0.997	-	-	2.074	24.319	5.86
5 pași	1.62	1	1	1	0.997	-	1.528	42.095	-3.64
6 pași	1.05	1	1	1	1	0.997	1.43	27.55	2.23

Ulterior, legile de mișcare definite de aceste valori, corespunzătoare orientării în intervalul răsărit → amiază, au fost transpuse pentru întreaga zi (răsărit → apus). Pentru exemplificare, în figurile 4.29 și 4.30 se prezintă legile de mișcare pentru 8 pași (4×2) de orientare diurnă și 2 pași (1×2) de elevație. În cazul sistemului cu orientare în pași, respectiv sistemului fix, se obțin următoarele cantități de energie: $E_T = 9875.9$ Wh/zi, $E_F = 6704$ Wh/zi (pentru $N = 229$), respectiv $E_T = 8533.9$ Wh/zi, $E_F = 6232.83$ Wh/zi (pentru $N = 259$).

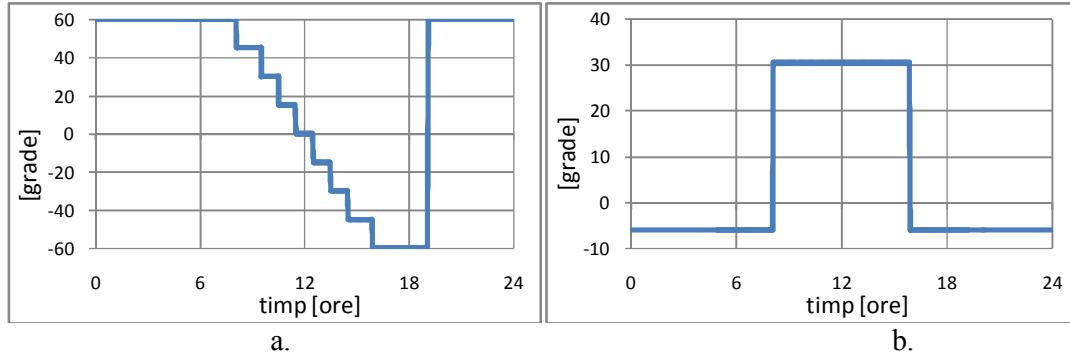


Figura 4.29. Legea de mișcare diurnă (a), respectiv de elevație (b) - $N = 229$.

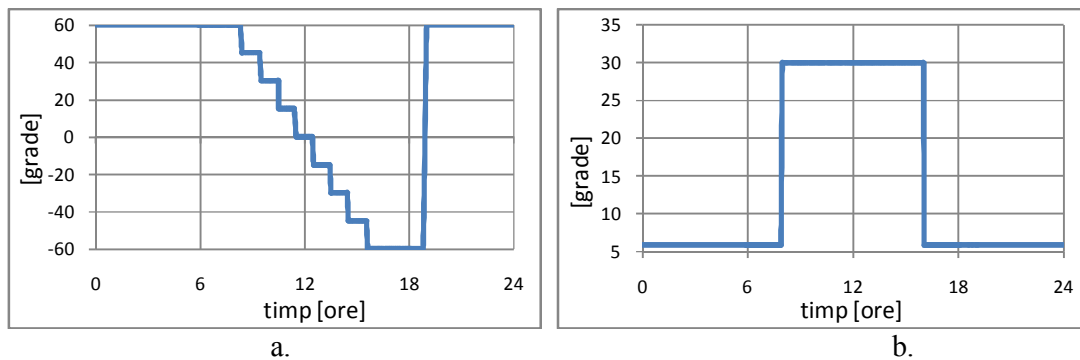


Figura 4.30. Legea de mișcare diurnă (a), respectiv de elevație (b) - $N = 259$.

Prin analiza dinamică a modelului virtual al sistemului de orientare (co-simulare ADAMS – EASY5), s-a obținut consumul de energie necesar orientării: $E_C = E_{Cd} + E_{Ce} = 275.6 + 27.6 = 303.2$ Wh/zi – pentru $N = 229$, respectiv $E_C = E_{Cd} + E_{Ce} = 275.6 + 19.6 = 295.2$ Wh/zi – pentru $N = 259$.

Tabelul 4.3. Bilanțul energetic al sistemului - $N = 229$.

Caz de orientare	$E_{T/F}$ [Wh/zi]	E_C [Wh/zi]	Câștig [%]
pas cu pas	9875.9	303.2	42.7
fix	6704	-	-

Tabelul 4.4. Bilanțul energetic al sistemului - $N = 259$.

Caz de orientare	$E_{T/F}$ [Wh/zi]	E_C [Wh/zi]	Câștig [%]
pas cu pas	8533.99	295.2	32.18
fix	6232.83	-	-

Pe baza acestor valori, se efectuează balanța energetică a sistemului (rezultatele fiind sistematizate în tabelele 4.3. și 4.4.): $E_T - (E_F + E_C) = 9875.9 - (6704 + 303.2) = 2868.7$ Wh/zi, ceea ce corespunde unui câștig energetic de 42.7 % adus de orientare, relativ la cazul sistemului fix – pentru $N = 229$, respectiv $E_T - (E_F + E_C) = 8533.9 - (6232.83 + 295.2) = 2005.87$ Wh/zi, ceea ce corespunde unui câștig energetic de 32.18% - pentru $N = 259$.

Calculare similare au fost efectuate pentru toate sezoanele/zilele reprezentative din an, obținându-se un câștig mediu anual de 34.79%. Această valoare justifică utilizarea mecanismului de orientare propus. Performanța sistemului este demonstrată și de precizia de orientare, erorile de poziționare (care ar fi avut ca efect pierderi de radiație solară incidentă) fiind nesemnificative. De exemplu, în figura 4.37 se prezintă diagrama de variație în timp a erorii de orientare pentru legea de mișcare diurnă din figura 4.29, a. Rezultate similare s-au obținut și pentru mișcarea de elevație.

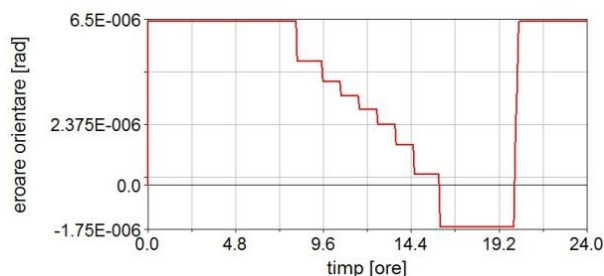


Figura 4.37. Eroarea de orientare pentru legea de mișcare diurnă în pași.

4.5. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Pe baza cercetărilor efectuate se desprind următoarele **concluzii**:

- prin integrarea dispozitivului mecanic și sistemului de control la nivelul prototipului virtual al mecanismului de orientare, se minimizează riscul ca legea de control să nu fie „urmărită” de modelul mecanic;
- pentru condiții atmosferice variabile (așa cum este cazul zonei Brașov) se preferă utilizarea unui sistem de control în circuit deschis (bazat pe algoritm/program predefinit de orientare), și nu în circuit închis (cu fotosenzori, care pot induce erori în detectarea poziției reale a Soarelui);
- toate tipurile de controlare investigate conduc la comportament corespunzător, condiții în care se alege soluția cea mai simplă/ieftină de controler (amplificator);
- schema de control mono-bucă cu controler proporțional asigură stabilitatea și robustețea sistemului (inclusiv atunci când asupra acesteia acționează perturbații externe nestăționare – ex. vânt);
- precizia de orientare prin sistemul propus este foarte bună, erorile de orientare fiind nesemnificative ($RMS \approx 10^{-6}$);
- prin optimizarea simultană a legilor de mișcare (diurnă și elevație) se asigură incidența optimă, cu efect benefic asupra eficienței energetice a sistemului;
- strategia de orientare pas-cu-pas este apropiată ca și eficiență energetică de cazul ideal (orientare continuă);
- orientarea platformei de șiruri PV aduce un câștig energetic de 34.79% (valoare medie anuală) relativ la sistemul echivalent fix.

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

- conceperea schemei de control și modelarea sistemului de orientare în concept mecatronic;
- modelarea funcției obiectiv și a variabilelor de proiectare pentru optimizarea sistemului de control;
- optimizarea parametrică a sistemului de control - determinarea valorilor optime ale factorilor de acordare ai controlerelor;
- modelarea funcției obiectiv, variabilelor de proiectare și constrângerilor pentru optimizarea simultană a legilor de mișcare (diurnă și elevație);
- proiectarea optimală a legilor de mișcare, care implică, printre altele, momentele optime de acționare/efectuare a pașilor de orientare;
- evaluarea eficienței energetice a sistemului de orientare.

5. REALIZAREA ȘI TESTAREA MODELULUI EXPERIMENTAL

5.1. DEZVOLTAREA MODELULUI EXPERIMENTAL

Dintre soluțiile prezentate în capitolul 3, s-a reținut ca variantă de bază sistemul din figura 3.1. Platforma de șiruri PV folosește ca surse de acționare două actuatoare liniare, unul care acționează direct asupra cadrului platformei, generând astfel mișcarea diurnă, și celălalt care acționează asupra bielei unui mecanism multi-paralelogram, transmițând mișcarea de elevație între șirurile cu module PV. Această soluție a fost utilizată atât în cazul prototipului virtual (v. cap. 3), cât și pentru modelul experimental (prototipul fizic) al sistemului de orientare pentru platforma de șiruri PV.

Dezvoltarea modelului experimental a cuprins următoarele etape: modelarea în solid a sistemului - proiectare de detaliu; realizarea desenelor de execuție și ansamblu; achiziționarea 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. Modelul experimental al sistemului de orientare pentru platforma de șiruri de module fotovoltaice cuprinde două componente majore: dispozitivul mecanic și sistemul de acționare & control.

A) Dispozitivul mecanic (fig. 5.1, 5.2):

- suport;
- rame module;
- rulmenți SKF 6205 2ZR;
- module fotovoltaice 250W;
- elemente pentru montarea/fixarea actuatorilor;
- elemente de asamblare (ex. șuruburi, piulițe).

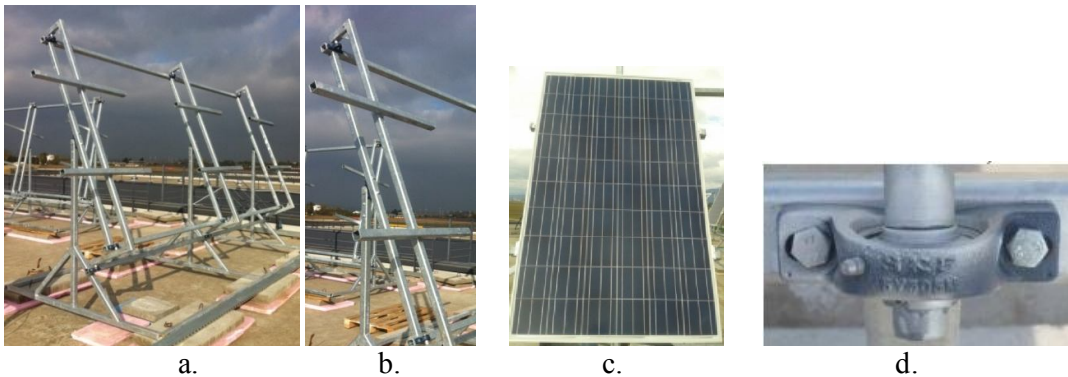


Figura 5.1. Componentele dispozitivului mecanic: suportul sistemului (a), rama modulului (b), modul PV (c), rulment SKF 6205 (d).

B) Dispozitivul de acționare & control:

- actuatoare liniare Aton2;
- controler de tip PLC GLOFA, model G7M-DT02U(N);
- sursă de alimentare;
- sistem de achiziție data logger cu placă National Instruments 6218 și computer;
- elemente pentru conectare (ex. cabluri).



Figura 5.2. Modelul experimental al platformei PV cu sistem de orientare pseudo-azimutal.

5.2. IMPLEMENTAREA MODELULUI EXPERIMENTAL

După cum s-a menționat, modelul fizic (experimental) al sistemului de orientare pentru platforma de șiruri 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 4 al tezei de doctorat, corespunzătoare celor 12 sezoane/zile reprezentative din an.

În vederea evaluării eficienței energetice a platformei de șiruri de module fotovoltaice cu mecanism de orientare bi-axială, datele obținute pe modelul experimental anterior descris au fost comparate cu date de referință corespunzătoare unui sistem echivalent fix (fig. 5.4) [82]. Modelul experimental cu orientare fixă, folosit ca referință, este prevăzut cu aceleași componente ca și modelul cu orientare bi-axială, cu excepția componentelor aferente mișcării. Cele trei module PV ale sistemului de referință (identice ca dimensiuni și caracteristici cu modulele sistemului pseudo-azimutal bi-axial) sunt fixate în poziția de amiază, corespunzătoare cu unghiurile echivalente $\varepsilon^* = 0^\circ$, $\rho^* = 40^\circ$.



Figura 5.4. Sistemul echivalent fix folosit ca referință.

5.3. ACHIZIȚIA ȘI PRELUCRAREA DATELOR EXPERIMENTALE

Platformele de șiruri PV (cu și fără orientare) au fost monitorizate concomitent, achiziționându-se puterea generată pe durata mai multor zile, în condiții climatice diverse (cer senin, înnorat, ploaie). Prototipul fizic funcționează pe baza programelor de orientare stabilite prin optimizarea legilor de mișcare (v. capitolul 4).

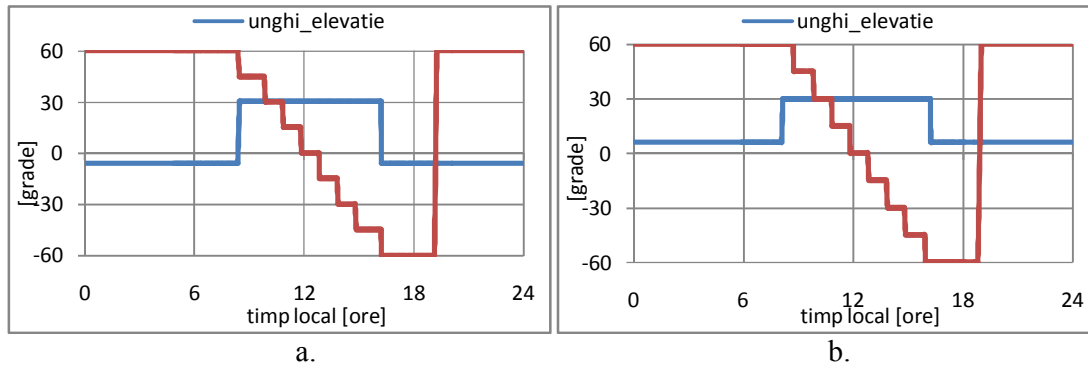


Figura 5.6. Legile de mișcare – orientare: sezon “8” (a), sezon “9” (b).

În continuare se prezintă datele/rezultatele specifice sezonelor “8” (August) și “9” (Septembrie), pentru care programele de orientare sunt redată în tabelul 5.1, respectiv tabelul 5.2. În ambele sezoane s-au folosit programe de orientare cu 8 pași (4 x 2) pentru mișcarea diurnă și 2 pași (1 x 2) pentru elevație. Pentru mișcarea diurnă, intervalul $\varepsilon^* \in [60^\circ, -60^\circ]$ (determinat ca optim în cap. 2) a fost împărțit în pași egali ($120^\circ / 8 \text{ pași} = 15^\circ / \text{pas}$), momentele de acționare fiind cele determinate în subcap. 4.4. (v. tab. 4.1 & 4.2). Pentru mișcarea de elevație s-au folosit datele obținute prin algoritmul de proiectare optimală din cap. 4 (considerând $\rho^* = \rho_0 + \Delta\rho_1$ – v. tab. 4.1 & 4.2). Legile de mișcare astfel obținute sunt prezentate în figura 5.6.

Dintre rezultatele experimentale obținute (care sunt înregistrate zilnic într-o bază de date pe calculator), în figura 5.7 se prezintă curbele de putere pentru platforma PV orientată conform legilor de mișcare din figura 5.6 și respectiv platforma PV de referință (fixă). Înregistrările corespund zilelor de 8 august (N = 220), 9 august (N = 221), 19 august (N = 231) și 7 septembrie (N = 250).

Tabelul 5.1. Programul de orientare pentru sezonul „8”.

mișc. diurnă	timp solar	timp local	unghi diurn (ε^*)	mișc. elevație	timp solar	timp local	unghi elevație (ρ^*)
răsărit	5.1	5.46	60	răsărit	5.1	5.46	-5.87
pas 1	8.11	8.47	45	pas 1	8.11	8.47	30.52
pas 2	9.51	9.87	30				
pas 3	10.51	10.87	15				
pas 4	11.51	11.87	0				
pas 5	12.49	12.85	-15				
pas 6	13.49	13.85	-30				
pas 7	14.49	14.85	-45				
pas 8	15.89	16.25	-60	pas 2	15.89	16.25	-5.87
apus	18.9	19.26	-60	apus	18.9	19.26	-5.87

În continuare, prin integrarea curbelor de putere s-au obținut cantitățile de energie electrică produse de sistemul orientat, respectiv fix (fig. 5.8), în zilele considerate, după cum urmează:

- N = 220: $EgT = 9649.77 \text{ Wh/zi}$, $EgF = 6274.88 \text{ Wh/zi}$;
- N = 221: $EgT = 9635.47 \text{ Wh/zi}$, $EgF = 6270.85 \text{ Wh/zi}$;
- N = 231: $EgT = 9687.75 \text{ Wh/zi}$, $EgF = 6226.98 \text{ Wh/zi}$;
- N = 250: $EgT = 8198.23 \text{ Wh/zi}$, $EgF = 5975.55 \text{ Wh/zi}$.

Tabelul 5.2. Programul de orientare pentru sezonul „9”.

mișc. diurnă	timp solar	timp local	unghi diurn (ϵ^*)	mișc. elevație	timp solar	timp local	unghi elevație (ρ^*)
răsărit	5.88	6.24	60	răsărit	5.88	6.24	5.86
pas 1	8.39	8.75	45	pas 1	7.95	8.15	30.05
pas 2	9.49	9.85	30				30.05
pas 3	10.5	10.86	15				30.05
pas 4	11.49	11.85	0				30.05
pas 5	12.5	12.86	-15				30.05
pas 6	13.5	13.86	-30				30.05
pas 7	14.5	14.86	-45				30.05
pas 8	15.6	15.96	-60	pas 2	16.05	16.25	5.86
apus	18.12	18.48	-60	apus	18.12	18.48	5.86

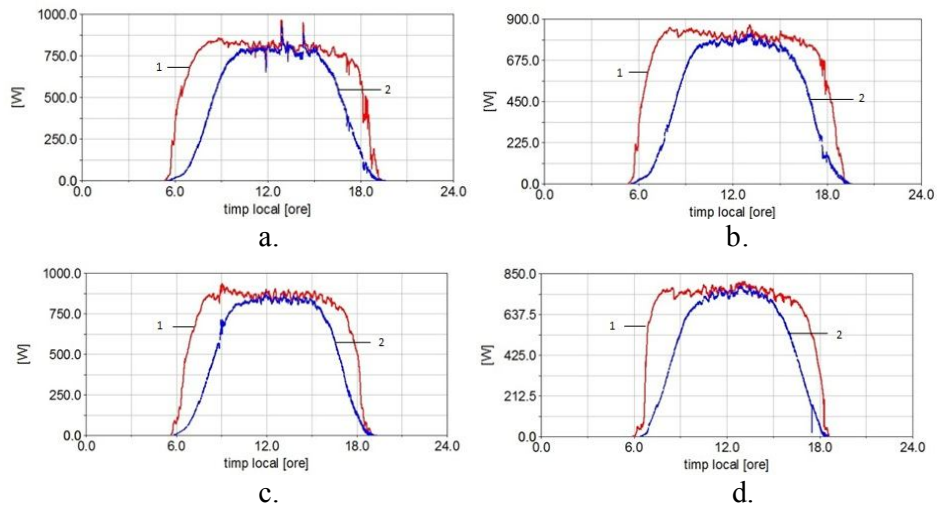


Figura 5.7. Puterea generată de sistemul mobil (1) și respectiv fix (2): $N = 220$ (a), $N = 221$ (b), $N = 231$ (c), $N = 250$ (d).

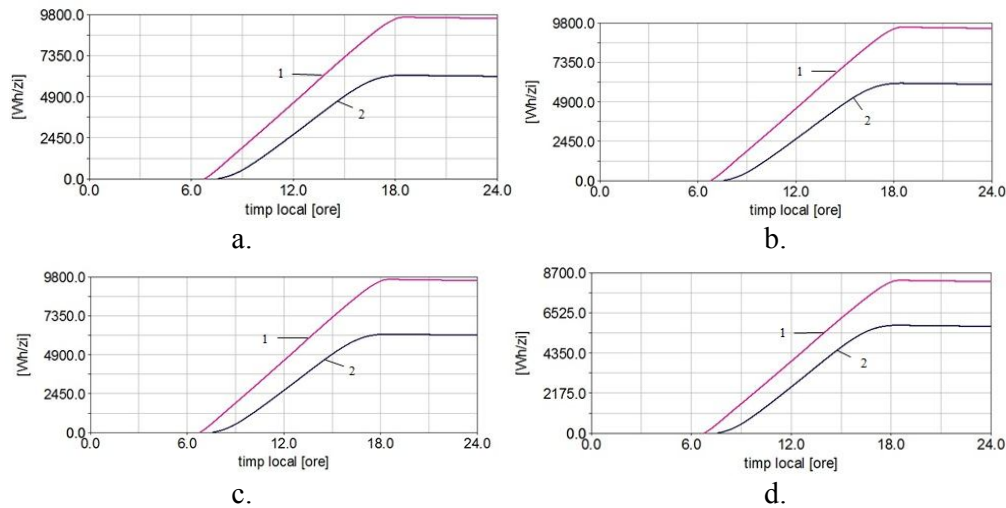


Figura 5.8. Energia produsă de sistemul mobil (1), respectiv fix (2): $N = 220$ (a), $N = 221$ (b), $N = 231$ (c), $N = 250$ (d).

5.4. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Din cele anterior prezentate se desprind următoarele concluzii:

- rezultatele experimentale pentru zilele cu cer senin validează rezultatele obținute prin simularea prototipului virtual al platformei PV (modelul teoretic al radiației solare ia în considerare doar componenta directă, nu și pe cea difuză);
- pentru condiții meteorologice diverse (senin, înnorat, ploaie) din sezonul de vară-toamnă (august - septembrie), în care s-au făcut înregistrări de date experimentale, relativ la sistemul de referință fix, prin orientarea bi-axială a platformei de șiruri de module fotovoltaice se obține un aport de energie de aproximativ 32.58%;
- în zilele cu cer acoperit de nori (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:

- elaborarea desenelor de execuție și de ansamblu;
- adaptarea programul de orientare la cerințele modulului de control al sistemului de acționare (determinarea impulsurilor);
- participarea la realizarea și implementarea prototipului fizic al sistemului de orientare pentru platforma PV;
- achiziția și prelucrarea datelor experimentale, în vederea analizei comparative dintre performanțele energetice ale prototipului fizic în raport cu un model experimental cu orientare fixă, considerat ca sistem de referință.

6. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE. DISEMINAREA REZULTATELOR

6.1. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Obiectivul general al tezei de doctorat se referă la *creșterea eficienței energetice a sistemelor fotovoltaice de tip platforme de șiruri cu orientare pseudo-azimutală bi-axială, prin maximizarea gradului de utilizare a radiației solare și minimizarea consumului energetic pentru realizarea orientării, studiul fiind abordat în concept mecatronic.* Pe baza cercetărilor efectuate, se pot extrage următoarele concluzii și contribuții originale.

Concluzii finale:

- gradul de conversie a energiei solare în electricitate poate fi îmbunătățit prin optimizarea conversiei la nivelul modulului, prin materiale și tehnologii de depunere performante, respectiv prin maximizarea gradului de colectare a radiației solare, ceea ce implică utilizarea sistemelor pentru orientarea modulului;
- sistemul de orientare pseudo-azimutal, derivat din sistemul azimutal prin schimbarea poziționării axei mișcării diurne (de pe verticală pe orizontală) reprezintă cea mai bună soluție pentru a orienta platforme de șiruri de module fotovoltaice, datorită stabilității structurii;
- pentru evaluarea eficienței sistemului PV cu orientare pseudo-azimutală, cele 12 zile reprezentative din an sunt: 16, 45, 75, 105, 135, 160, 198, 229, 259, 289, 319, 344 (unde „1” corespunde cu 1 Ianuarie);
- unghiul de elevație ρ^* optim pentru programul de orientare sezonier, corespunzător celor 12 zile reprezentative din an, are valorile: 61° , 54° , 39° , 25° , 12° , 8° , 11° , 21° , 35° , 51° , 62° și 64° ;
- sistemele de orientare de tip pseudo-azimutal bi-axiale au o eficiență mai ridicată decât cele mono-axiale, motiv pentru care sunt recomandate pentru zona geografică Brașov;
- soluția optimă a mecanismului de orientare pentru sistemul PV este: *un mecanism de orientare pseudo-azimutal bi-axial, acționat de două actuatori liniari, cu transmiterea mișcării între module/șiruri printr-un mecanism multi-paralelogram*;
- factorul extern principal este vântul, prin situațiile de încărcare pe suprafața modulului obținându-se următoarele momente maxime generate de acțiunea vântului: 19,69 Nm – pentru încărcare pe lungimea modulului, respectiv 11,58 Nm – pentru încărcare pe lățimea modulului;
- modelarea & simularea în mediu virtual precede realizarea - implementarea prototipului fizic, vizând evaluarea comportamentului cinematico-dinamic al mecanismului de orientare;
- studiul de optimizare a dispozitivului mecanic conduce la o reducere substanțială a forțelor motoare, cu modificări minore în configurația geometrică a mecanismului, ceea ce are efect benefic asupra eficienței energetice a sistemului (prin consumul de energie necesar orientării);
- prin integrarea dispozitivului mecanic și sistemului de control la nivelul prototipului virtual al mecanismului de orientare, se minimizează riscul ca legea de control să nu fie „urmărită” de modelul mecanic;
- pentru condiții atmosferice variabile (așa cum este cazul zonei Brașov) se preferă utilizarea unui sistem de control în circuit deschis (bazat pe algoritm/program predefinit de orientare), și nu în circuit închis (cu fotosenzori, care pot induce erori în detectarea poziției reale a Soarelui);

- toate tipurile de controlere investigate (PID, PD, PI, P) conduc la comportament corespunzător, condiții în care se alege soluția cea mai simplă/ieftină de controler (amplificator - P);
- schema de control mono-bucă cu controler proporțional asigură stabilitatea și robustețea sistemului (inclusiv atunci când asupra acestuia acționează perturbații externe nestaționare – ex. vânt);
- precizia de orientare prin sistemul propus este foarte bună, erorile de orientare fiind ne semnificative ($RMS \approx 10^{-6}$);
- prin optimizarea simultană a legilor de mișcare (diurnă și elevație) se asigură incidența optimă, cu efect benefic asupra eficienței energetice a sistemului;
- strategia de orientare pas-cu-pas este apropiată ca și eficiență energetică de cazul ideal (orientare continuă);
- orientarea platformei de șiruri PV aduce un câștig energetic de 34.79% (valoare medie anuală) relativ la sistemul echivalent fix;
- rezultatele experimentale pentru zilele cu cer senin validează rezultatele obținute prin simularea prototipului virtual al platformei PV (modelul teoretic al radiației solare ia în considerare doar componenta directă, nu și pe cea difuză);
- pentru condiții meteorologice diverse (senin, înnorat, ploaie) din sezonul de vară-toamnă (august - septembrie), în care s-au făcut înregistrări de date experimentale, relativ la sistemul de referință fix, prin orientarea bi-axială a platformei de șiruri de module fotovoltaice se obține un aport de energie de aproximativ 32.58%;
- în zilele cu cer acoperit de nori (ploaie) se recomandă ca sistemul să fie orientat fix către Sud (nu se justifică orientarea).

Contribuții originale:

- determinarea zilelor reprezentative din an;
- analiza comparativă a eficiențelor de orientare pentru sistemele pseudo-azimutale în varianta bi-axial și mono-axial;
- determinarea perechii optime de unghiuri pentru cele două programe de orientare (sezonier și anual), pereche reprezentată prin domeniul unghiular al unghiului diurn și valoarea unghiului de elevație;
- modelarea eficienței de captare a radiației solare pentru sistemele de orientare pseudo-azimutale bi-axial și mono-axial;
- identificarea eficienței de orientare maximă pentru sistemele de orientare pseudo-azimutale bi-axial și mono-axial, pentru zona Brașov;
- conceperea soluției optime a sistemului de orientare pseudo-azimutal bi-axial;
- conceperea a trei variante de mecanisme de orientare derivate din soluția de bază: mecanism de orientare bi-axial cu amplificator de cursă pentru mișcarea diurnă de tip patruleter; mecanism de orientare bi-axial cu amplificator de cursă pentru mișcarea diurnă de tip conic; mecanism de orientare bi-axial cu singură sursă motoare (cea a mișcării diurne) pentru generarea ambelor mișcări (diurnă și elevație);
- modelarea solidă a mecanismelor de orientare în mediu CAD;
- modelarea ca sistem multicorp a mecanismului de orientare (separat pe subsisteme și în ansamblu);
- determinarea momentelor de încărcare determinate de acțiunea vântului;
- conceperea modelelor pentru analiza în mediul virtual a mecanismului de orientare (model cinematic, model dinamic invers, model dinamic);

- modelarea variabilelor de proiectare, funcției obiectiv & constrângerilor de proiectare și optimizarea subsistemelor de transmitere a mișcărilor pentru orientarea diurnă și de elevație;
- conceperea schemei de control și modelarea sistemului de orientare în concept mecatronic;
- modelarea funcției obiectiv și a variabilelor de proiectare pentru optimizarea sistemului de control;
- optimizarea parametrică a sistemului de control - determinarea valorilor optime ale factorilor de acordare ai controlerelor;
- modelarea funcției obiectiv, variabilelor de proiectare și constrângerilor pentru optimizarea simultană a legilor de mișcare (diurnă și elevație);
- proiectarea optimală a legilor de mișcare, care implică, printre altele, momentele optime de acționare/efectuare a pașilor de orientare;
- evaluarea eficienței energetice a sistemului de orientare;
- elaborarea desenelor de execuție și ansamblu;
- adaptarea programului de orientare la cerințele modulului de control al sistemului de acționare (determinarea impulsurilor);
- participarea la realizarea și implementarea prototipului fizic al sistemului de orientare pentru platforma PV;
- achiziția și prelucrarea datelor experimentale, în vederea analizei comparative dintre performanțele energetice ale prototipului fizic în raport cu un model experimental cu orientare fixă, considerat ca sistem de referință.

6.2. DISEMINAREA REZULTATELOR

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

I. 10 articole științifice (ca prim autor), dintre care:

I.1. lucrări indexate ISI - 4 (1 lucrare cotate ISI):

- **M.A. Ioniță**, C. Alexandru. Dynamic optimization of the tracking system for a pseudo-azimuthal photovoltaic platform. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 4, nr. 5, p. 053117(1-15), 2012, DOI: 10.1063/1.4757630 (factor impact: 1.514, sri: 0.551);
- **M.A. Ioniță**, C. Alexandru. Optimal design of the mechanical device for a photovoltaic tracking mechanism. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 186, 2012, p. 114-123, DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.186.114;
- **M.A. Ioniță**, C. Alexandru. Control system design for a mechatronic solar tracker. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 332, 2013, p. 248-253. DOI 10.428/www.scientific.net/AMM.332.248;
- **M.A. Ioniță**, C. Alexandru. Optimal design of the motion law for a pseudo-azimuthal tracking system. *Proceedings of the 11th IFToMM International Symposium-SYROM*, SPRINGER, 2013 (acceptată pentru publicare).

I.2. lucrări indexate BDI - 6.

II. propuneri de brevete:

- **M.A. Ioniță**, C. Alexandru, Mecanism de orientare pentru o platformă de șiruri de captatori solari. Nr. OSIM A/00687/16.09.13.
- I. Vișa, D. Diaconescu, M. Neagoe, C. Jaliu, C. Alexandru, B. Dobre, **M.A. Ioniță**, R. Săulescu, M. Macedon, M. Vătășescu, Actuator de joasă viteză cu reductor articulată intermitent. Nr. OSIM A/00664/19.09.12, Patent Number RO128120-A0.

6.3. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Ca și direcții viitoare de cercetare se propun următoarele:

- introducerea de parametri climatici noi (ex. radiația difuză) pentru a finisa modelul radiației solare și legea de mișcare (orientare);
- analiza cu elemente finite (FEA) a sistemului de orientare pentru platforma de șiruri de module fotovoltaice;
- proiectarea & implementarea unui sistem de control inteligent, capabil să adapteze orientarea platformei de șiruri de module fotovoltaice în funcție de prognoze și date meteo reale.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ:

2. Alexandru, C. and Pozna, C. *Dinamica sistemelor mecanice pe baza prototipării virtuale*. Ed. Univ. Transilvania din Braşov, 2003.
3. Alexandru, C., Tatu, I., *Simulating the virtual prototype of a photovoltaic tracking mechanism*, în Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol. IX, Nr. 1, p. 6-11 (ULRICH'S Database, Index COPERNICUS), 2011.
4. Alexandru, C. *Modelling and Simulation of the Tracking Mechanism Used for a Photovoltaic Platform*, în New Trends in Mechanism Science, p. 575-582, 2010.
5. Alexandru, C., Pozna, C., *Simulation of a dual-axis solar tracker for improving the performance of a photovoltaic panel*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, vol. 224, nr. 6, p. 797-811, 2010.
6. Alexandru, C. *Software platform for analyzing&optimizing the mechanical systems*, Proceedings of the 10th IFToMM International Symposium on Science of Mechanisms and Machines - SYROM 2009 (International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science), Braşov, p. 665-677, Springer, ISBN 978-90-481-3521-9, DOI 10.1007/978-90-481-3522-6_56, 2009.
10. Bostan, I., Dulgheru, V., Sobor, I., Bostan, V., Sochireanu, A., *Sisteme de conversie a energiilor regenerabile*, Ed. Tehnica-Info, Chisinau, 2007.
11. Burduhos, B. G. (teză doctorat). *Optimizarea mecanismelor de orientare de tip pseudo-ecuatorial utilizate pentru creşterea eficienţei conversiei panourilor fotovoltaice individuale*, Universitatea Transilvania din Braşov, Octombrie 2009.
20. Coelho, A. and Castro, R. *Modeling and validation of PV power output with solar tracking*. Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives - PowerEng, Malaga, 2011, p. 1-6.
23. Coste, L., Eftimie, E. *Solar and Wind Power Determination for Braşov City Area*, în Bulletin of the Transilvania University of Braşov, 2008.
24. Datta, M., Senjyu, T., Yona, A., Funabashi, T., Chul-Hwan Kim. *Photovoltaic output power fluctuations smoothing methods for single and multiple PV generators*, în Current Applied Physics, vol. 10, p. 265-270, 2010.
25. Dehelean, N.M. and Dehelean, L.M. *A Mirror Tracking Mechanism*, Mechanisms, Transmissions and Applications - Mechanisms and Machine Science, Springer, vol. 3 (2), pp. 111-123, 2012.
30. Duffie, J. A., Beckman, W. A. *Solar Engineering of thermal processes* - 2nd edition, A Wiley Interscience Publication, 1991.
41. **Ioniţă, M.A.**, Alexandru, C. *General aspects on the design and simulation of the photovoltaic tracking systems*, Annals of the Oradea University. Fascicle of Management and Technological Engineering, Volumul X, Nr 2, p. 30-35, ISSN 1583-0691, 2011.
42. **Ioniţă, M.A.**, Alexandru, C. *Simulation of a dual-axis tracking system for PV modules*. Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series I: Engineering Sciences. VOL. 4 (53) No. 2, p. 45-52, ISSN 2065-2119, 2011.
43. **Ioniţă, M.A.**, Alexandru, C. *Parametric Optimization of a Tracking System for the Photovoltaic Modules*, IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, ISBN: 978-1-4673-0701-7, p. 313-318, 2012, DOI 10.1109/AQTR.2012.6237723.
44. **Ioniţă, M.A.**, Alexandru, C. *Dynamic Optimization of a 2-DOF Pseudo-Equatorial Tracking System*, Journal of Energy and Power Engineering, David Publishing, USA, p.713-718, ISSN 1934-8975, 2012.
45. **Ioniţă, M.A.**, Alexandru, C. *Dynamic optimization of the tracking system for a pseudo-azimuthal photovoltaic platform*. Journal of Renewable and Sustainable Energy, vol.

- 4, nr. 5, p. 053117(1-15); 2012, DOI: 10.1063/1.4757630 (factor impact: 1.514, sri: 0.551).
46. **Ioniță, M.A.**, Alexandru, C. *Comparison between mono-axis and bi-axis tracking for a PV platform*. Bulletin of the Transilvania University of Brașov, vol. 5 (54), nr. 1, 2012, p. 39-44, ISSN 2065-2119.
47. **Ioniță, M.A.**, Alexandru, C. *Optimal design of the mechanical device for a photovoltaic tracking mechanism*. Applied Mechanics and Materials, vol. 186, p. 114-123, 2012, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.186.114.
48. **Ioniță, M.A.**, Alexandru, C. *Optimal design of the motion law for a pseudo-azimuthal tracking system*. Proceedings of the 11th IFToMM International Symposium-SYROM, SPRINGER, 2013 (acceptată pentru publicare).
49. **Ioniță, M.A.**, Alexandru, C. *Control system design for a mechatronic solar tracker*. Applied Mechanics and Materials, vol. 332, 2013, p. 248-253. DOI 10.428/www.scientific.net/AMM.332.248.
50. **Ioniță, M.A.**, Alexandru, C. *Designing and optimizing the control system for a pseudoazimuthal sun tracker*. Bulletin of the Transilvania University of Brașov. Series I: Engineering Sciences, vol. 6 (55), nr. 2, 2013 (acceptată pentru publicare).
55. Lipták, B. *Instrument Engineers Handbook: Process Control and Optimization* (4th ed.), CRC Press, pp. 108, 2003.
61. Meliss, M. *Regenerative Energie-Quellen Praktikum*, Springer, Berlin, 1997.
75. Seme, S., Stumberger, G. and Vorsic, J. *Maximum Efficiency Trajectories of a Two-Axis Sun Tracking System Determined Considering Tracking System Consumption*, in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26 (4), pp. 1280-1290, 2011.
76. Seme, S., Stumberger, G. *A novel prediction algorithm for solar angles using solar radiation and differential evolution for dual-axis sun tracking purposes*, Solar Energy, vol. 85 (11), pp. 2757-2770, 2011.
77. Seme, S., Stumberger, S. *Single or dual axis trackers, control systems and electric drive losses for photovoltaic applications*. International Conference on Renewable Energies and Power Quality, 2013.
82. Tatu, I.N. (teză de doctorat) *Analiza și optimizarea mecanismelor de orientare pentru șiruri de module fotovoltaice*. Universitatea Transilvania Brașov, 2012.
87. Velicu, R., Lateș, M., Moldovean, Gh. *Analysis and Simulation of Azimuthal Solar Tracking System with Linear Actuators*, în Proceedings of The 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany, p. 3719-3722, 21-25 September 2009.

Brevete (selecție):

94. **Ioniță, M.A.**, Alexandru, C. *Mecanism de orientare pentru o platformă de șiruri de captatori solari*. Nr. OSIM A/00687/16.09.13.
95. Scanlon, M. US20110073161A1, *High efficiency counterbalanced dual axis solar tracking array frame system*, 2011.
97. Vișa, I., D. Diaconescu, M. Neagoe, C. Jaliu, C. Alexandru, B. Dobre, **M.A. Ioniță**, R. Săulescu, M. Macedon, M. Vătășescu, *Actuator de joasă viteză cu reductor articulat intermitent*. Nr. OSIM A/00664/19.09.12, Patent Number RO128120-A0.

Site-uri (selecție)

115. <http://www.zomeworks.com/cable-tracker>.
116. <http://www.af.net/885-0-SkyCarrier.html>.
117. <http://www.watt-tracker.com/PoleTracker.html>.

Creșterea eficienței sistemelor de șiruri fotovoltaice prin orientare pseudo-azimutală
Increasing the efficiency of photovoltaic arrays through pseudo-azimuthal tracking

Doctorand: Monica Alina IONIȚĂ (căs. Boțoman) Conducător: prof. dr. ing. Cătălin Alexandru

REZUMAT

Cuvinte cheie: *platformă de șiruri de module fotovoltaice, mecanism de orientare, sistem de control, prototipare virtuală, optimizare.*

Obiectivul general al tezei de doctorat se referă la creșterea eficienței energetice a sistemelor fotovoltaice de tip platforme de șiruri cu orientare pseudo-azimutală bi-axială, studiul fiind abordat în concept mecatronic. Obiectivul propus este îndeplinit prin proiectarea unui sistem de orientare, care maximizează cantitatea de radiație solară captată, minimizându-se totodată energia consumată pentru realizarea orientării. Mecanismul de orientare propus este modelat în mediu CAD (CATIA), 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 (EASY5), se stabilește schema optimă de control 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 controlerului, vizându-se minimizarea erorii de orientare. Totodată, se realizează optimizarea simultană a legilor de mișcare (diurnă și elevație), asigurând o incidență optimă a razelor solare, cu efect benefic asupra eficienței energetice a sistemului. Pe baza rezultatelor obținute prin testarea în mediu virtual, se proiectează - realizează prototipul fizic pentru platforma de șiruri de module fotovoltaice cu orientare bi-axială, modelul experimental fiind implementat la Institutul CDI – Produse High Tech pentru Dezvoltare Durabilă (Pro-DD) al Universității Transilvania din Brașov.

ABSTRACT

Keywords: *photovoltaic strings platform, tracking mechanism, control system, virtual prototyping, optimization.*

The general objective of the thesis consists of increasing the energetic efficiency of the tracking systems for strings platform of photovoltaic modules with pseudo-azimuthal tracking, 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. The tracking mechanism is modeled in a CAD environment (CATIA), 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 (EASY5), the optimal control scheme is determined, 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 controller parameters, focusing on minimizing the tracking errors. At the same time, the optimization of the tracking laws (for the daily & elevation motions) is performed ensuring optimal incidence of the sun-rays, with positive effect on the energetic efficiency of the system. Based on the simulation results, the physical prototype (i.e. the experimental model) is designed and developed, considering a photovoltaic modules strings platform with bi-axial pseudo-azimuthal 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:	
Nume / Prenume	IONIȚĂ MONICA ALINA (căs. BOȚOMAN)
Adresă	Str. G-ral Mociulschi nr. 21, Brașov, România
Telefon	0728898262
E-mail	monica.ionita@unitbv.ro, monica.ionita@yahoo.com
Cetățenie	Română
Data și locul nașterii	11 Iunie 1980, Brașov
Experiența profesională:	
2010-2012	Universitatea Transilvania Brașov, cadru didactic asociat în cadrul facultății de <i>Design de produs și Mediu</i>
Mai 2011	Utilizare ADAMS – Modul de bază, diplomă de absolvire
Ian. 2008 – sept. 2008	Grafician, Edith Media srl, Brașov
2004-2008	Tehnoredactor, Genials Corporation, Brașov
Educație:	
2010-2013	<i>Doctorand</i> în domeniul: <i>Inginerie Mecanică</i> , Tema tezei: <i>Creșterea eficienței sistemelor de șiruri fotovoltaice prin orientare pseudo-azimutală</i> Centrul de cercetare Sisteme de Energii Regenerabile și Reciclare, Universitatea Transilvania din Brașov
2010-2012	<i>Diplomă de Master</i> : Design de Produs pentru Dezvoltare Durabilă și Protecția Mediului, Traseu: Designul și Managementul Sistemelor de Energii Regenerabile, Universitatea Transilvania din Brașov
1999-2004	<i>Diplomă de Inginer Diplomat</i> , Facultatea de Inginerie Tehnologică, specializarea Design de Produs, Universitatea Transilvania din Brașov
1995-1999	<i>Diplomă de bacalaureat</i> , Liceul C.D. Nenițescu, Brașov
Publicații	
10 articole științifice (4 ISI, 6 BDI), două propuneri de brevet	
Limbi străine	
Engleză, Franceză	
Competențe și aptitudini de utilizare a calculatorului	
ADAMS, EASY5, Catia V5, Autocad, Corel Draw, Photoshop, MS Office	
MEMBRU al Asociației Române de Știința Mecanismelor și Mașinilor (ARoTMM)	

Curriculum vitae

Personal information:

Surname/Name **MONICA ALINA IONIȚĂ (căs. BOȚOMAN)**
 Address G-ral Mociulschi 21, Brașov, România
 Telephone 0728898262
 E-mail monica.ionita@unitbv.ro, monica.ionita@yahoo.com
 Nationality Romanian
 Date and place of birth 11th June 1980, Brașov

Professional experience:

2010-2012 Transilvania University of Brașov, assistant in the Faculty of *Product Design and Environment*
 May 2011 Use ADAMS – Basic module, graduation diploma
 Jan. 2008 – Sept. 2008 Graphic designer, Edith Media srl, Brașov
 2004-2008 Design editor, Genials Corporation, Brașov

Education:

2010-2013 PhD in the domain: *Mechanical Engineering*, Phd Thesis: *Increasing the efficiency of photovoltaic arrays through pseudo-azimuthal tracking*
 Transilvania University of Brașov, Research Center Renewable Energies Systems and Recycling
 2010-2012 *master degree*: Product Design for Sustainable Development and Environmental Protection
 Route: Design and Management of Renewable Energy Systems, Transilvania University of Brașov
 1999-2004 *engineer diploma*, Faculty of *Technological Engineering*, Specialisation Product Design, Transilvania University of Brașov
 1995-1999 *bachelor degree*, Lyceum C.D. Nenițescu from Brașov

Publications

10 scientific articles (4 ISI, 6 BDI), two patents proposal

Foreign languages

English, French

Computer skills

ADAMS, EASY5, Catia V5, Autocad, Corel Draw, Photoshop, MS Office

MEMBER of the Romanian Association for the Science of Mechanisms and Machines (ARoTMM)