

UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN TIMIȘOARA

Ing. DUMA VIRGIL-FLORIN

**CONTRIBUȚII LA ANALIZA ȘI SINTEZA
SISTEMELOR DE SCANARE**

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

**Coordonator științific:
Prof. Dr. Ing. Perju Dan**

629.805
369 A

**Timișoara
2001**

Cuprins

Cuprins	1
Cuvânt înainte	4
Introducere	5
I.1. Procesul de scanare	5
I.2. Dispozitivele de scanare (DS) laser	6
I.3. Structura tezei	8
Partea I: Stadiul actual în dezvoltarea tehnicilor și dispozitivelor de scanare	9
Capitolul 1. Dispozitive de scanare. Caracteristici	10
1.1. Clasificări și aplicații	10
1.1.1. Scanarea la distanță (Remote sensing)	10
1.1.2. Scanere pasive și active (input/output)	11
1.1.3. Mărimi caracteristice ale dispozitivelor de scanare	13
1.2. Scanarea la distanță	16
1.3. Scanere “input” și “output” (pasive și active)	24
1.4. Tipuri de dispozitive de scanare	26
1.4.1. Scanere poligonale	26
1.4.2. Scanere holografice	28
1.4.3. Scanere galvanometrice	31
1.4.4. Scanere acusto-optice	34
1.4.5. Scanere electro-optice	35
Capitolul 2. Aplicații ale tehnicilor de scanare	38
2.1. Scanarea în domeniul comercial	38
2.1.1. Scanarea codurilor de bare	38
2.1.2. Tehnici tipografice (Imprimanta laser)	40
2.1.3. Citirea memoriilor optice de mare capacitate	40
2.1.4. Sistem de televiziune laser	41
2.2. Scanarea în domeniul tehnicilor de laborator	42
2.2.1. Microscopia prin scanare	42
2.2.2. Tehnicile P.I.V.	46
2.3. Scanarea în domeniul industrial	49
2.3.1. Măsurători prin scanare	49
2.3.2. Sistem de măsurare automat prin triangulație laser	62
2.3.3. Stereolitografia 3D (S.L.A.)	62
Partea a II-a: Analiza și sinteza dispozitivelor de scanare	65
Capitolul 3. Dispozitive de scanare cu elemente în mișcare de rotație	66
3.1. Capul de scanare cu oglindă plană rotitoare	66
3.1.1. Funcția de scanare	66
3.1.2. Caracteristica de funcționare	67

3.1.3. Gradul de acoperire	74
3.2. Capul de scanare cu oglindă poligonală rotitoare	76
A. Analiza matematică a dispozitivului	76
3.2.1. Principiul de funcționare	76
3.2.2. Funcția de scanare	77
3.2.3. Gradul de acoperire	78
3.2.4. Caracteristica de funcționare	80
B. Sinteza/Calculul de proiectare al dispozitivului	82
3.2.5. Relații între parametrii constructivi ai dispozitivului	82
3.2.6. Calculul de proiectare	83
3.3. Cama optică	88
3.3.1. Ipoteze de lucru	88
3.3.2. Determinarea profilului unei fețe a camei optice	88
3.3.3. Aplicație	93
3.3.4. Segmentul Q_2Q_1'	94
3.3.5. Aproximarea profilului real	95
3.3.6. Determinarea unui profil impus al camei	96
Capitolul 4. Dispozitive de scanare cu elemente în mișcare de oscilație	102
4.1. Discuție preliminară. Justificarea alegerii soluției	102
4.2. Principiul de funcționare	103
4.3. Ecuatiile de funcționare. Elemente ale calculului de proiectare	106
4.4. Determinarea funcției de scanare	110
a. Legea liniară+polinomială	111
b. Legea liniară+sinusoidală	112
4.5. Determinarea funcției de comandă a dispozitivului	113
Capitolul 5. Scanarea bi (2D) și tridimensională (3D)	116
5.1. Scanarea bidimensională	116
5.2. Scanarea tridimensională	122
Partea a III-a: Aplicații ale tehnicilor de scanare.	127
Introducere la partea a III-a	128
Capitolul 6. Vignetarea fasciculelor de lumină în sisteme opticecentrate	129
6.1. Considerații generale asupra fenomenului de vignetare	129
6.1.1. Vignetarea	129
6.1.2. Limitarea fasciculelor de lumină în sistemele optice (S.O.)	130
6.1.3. Caracterizarea cantitativă a fenomenului de vignetare	132
6.2. Cercuri de obscurizare în planul de front	133
6.3. Studiul petei de lumină în planul pupilei de intrare	136
6.4. Coeficientul de vignetare geometric	139
6.5. Coeficientul de vignetare fotometric	140
Capitolul 7. Sisteme optice multipupilare	144
7.1. Determinarea pupilelor și lucarnelor de intrare. Caracterizarea geometrică a axei S.O. multipupilare	144
7.2. Caracterizarea fotometrică a axei S.O. multipupilare.	
Apertura fotometrică	149
7.3. Coeficientul fotometric axial al unui S.O. multipupilar	152

7.4. Izoluxe determinate de un obiect axial filiform pe suprafața pupilelor de intrare	154
7.5. Izoluxe determinate de un obiect axial filiform pe suprafața primului dioptru	156
Partea a IV-a: Studiul experimental al procesului de scanare. Concluzii	159
Capitolul 8: Determinări experimentale în analiza și sinteza dispozitivelor de scanare cu oglinzi rotitoare	160
8.1. Dispozitive de scanare cu oglindă poligonală	160
8.2. Dispozitive de scanare cu oglindă plană rotitoare	174
8.3. Uni-cama optică	177
Capitolul 9: Concluzii. Contribuții personale	181
9.1. Concluzii	181
9.2. Contribuții personale	184
Anexa 1: Elemente de fotometrie	187
A1.1. Mărimi și unități de măsură energetice/radiometrice și fotometrice/luminoase	187
A1.2. Legile fotometriei	189
A1.3. Etapele calculului fotometric	191
A1.4. Caracteristicile fotometrice a unor configurații de surse de lumină	193
A1.4.1. Sursă punctiformă	193
A1.4.2. Sursă suprafață elementară	194
A1.4.3. Sursă filiformă	195
Anexa 2: Elemente de sinteza dispozitivelor cu oglindă poligonală	198
A2.1. Calculul simpletului	198
A2.2. Deducerea funcției de “migrare” $z(h)$	200
A2.3. Superpoziția funcțiilor $z(h)$ și ds_h pentru simplet	201
A2.4. Calculul dubletului	202
A2.5. Superpoziția funcțiilor $z(h)$ și ds_h pentru dublet	205
Anexa 3: Rezolvarea grafică a ecuației (4.38)'	206
Bibliografie	208

Cuvânt înainte

Din cele mai vechi timpuri omul a dorit să cunoască. Demersul cognitiv și apoi cel creativ a îmbrăcat, de-a lungul evoluției umane, forme diverse; de la cele mai primitive forme de artă și de cunoaștere științifică, prin observarea și încercarea de comprehensiune a fenomenelor naturale, până la rafinamentul unui Botticelli și profunzimea gândirii unui Da Vinci, devansându-și contemporanii cu practic jumătate de mileniu, omul a învățat să se manifeste; să știe.

De la evenimentul de pe Golgota, prin exemplul Iubirii Hristice, dusă până la jertfă de sine pentru ceilalți, omul a primit în plus dimensiunea spirituală și astfel, azi, în triada spirit/afect-intelect-materie, există posibilitatea dezvoltării unei conștiințe a omului deplin.

Părintele acad. Dumitru Stăniloae vorbea de treptele evoluției omului: purificare, iluminare, îndumnezeire. Sfinți, eroi, artiști, cercetători, au parcurs parte din acest drum spre desăvârșire, constituindu-se, după Mântuitorul Iisus Hristos, în adevărate modele umane de urmat.

Căile sunt nenumărate, ținta evoluției, una singură: desăvârșirea. Religia, arta, știința, toate sunt căi de a sluji omenirea, pentru că prin fapte ne dovedim umanitatea.

Lucrarea aceasta este o fărâmiță din acest bob de cleștar, de cunoaștere limpede și curată care trebuie să fie **știința**.

Autorul

INTRODUCERE

I.1. Procesul de scanare

I.1.1. **A scana** (**to scan**, în limba engleză) înseamnă a parcurge, a baleia. Este ceea ce ochiul uman face mereu, scanând atât spațial: o linie, o suprafață, un volum, cât și/sau temporal, prin înregistrarea “cadrelor” succesive ale realității înconjurătoare.

Procesul scanării optice este inspirat din acest brevet al Naturii care este mecanismul vederii umane. Scanarea mecanică (cu palpatori ce parcurg linii, suprafețe sau volume) este, pe de altă parte, inspirată din mecanismul funcționării simțului tactil. Simțul auditiv își are ca și “aplicație” în scanare palparea câmpului de interes cu ajutorul radarului (atât spațială, cât și temporală), cu principiul bazat, se știe, pe sonarul delfinilor. Celelalte două simțuri: gustul și mirosul ar putea și ele comporta discuții, cel puțin în ceea ce privește o scanare “temporală” a unor probe sau spațiului investigat, ceea ce se practică, de exemplu, în analize organoleptice (probe chimice, alimentare, etc.).

Am putea concluziona, cu aceste considerente, că **bionica**, știință a convertirii “invențiilor” Naturii, această parte a Creației Divine, în realități ale științei și tehnicii umane, exista și funcționa ca atare cu mult înainte de definirea și fundamentarea ei ca știință.

“Inspirându-ne” din procesele și dispozitivele existente în realitatea înconjurătoare, au rezultat aparate specializate în realizarea, cu performanțe cât mai ridicate, a uneia (eventual, a unui mănunchi) din funcțiile pe care “aparatură” complex reprezentat de unul din simțurile umane sau a unui animal – v. delfinul - (cuprinzând și funcția specializată din SNC – sistemul nervos central), îl reprezintă.

I.1.2. În general în tehnica actuală, termenul de **scanare** definește doar parcurgerea spațială (mai rar temporală) a unui anumit mediu, de lucru sau investigat. Pe baza considerentelor de mai sus însă, se propune o extindere – firească, de altfel – a acestui concept, definind **scanarea ca procesul parcurgerii succesive spațiale sau temporale a unui mediu, urmărindu-se unul sau mai mulți dintre parametrii caracteristici ai acestuia, cu sau fără modificarea calităților intrinseci a mediului reprezentate de acești parametri.**

I.1.3. **Clasificarea procesului de scanare**, considerat în sens generalizat, se poate realiza după mai multe criterii:

A. După parametrul conținutului spațio-temporal implicat:

- **scanare spațială**: se realizează prin parcurgerea succesivă a regiunilor diferite a unui anumit mediu;
- **scanare temporală**: se urmărește evoluția în timp (cu un increment temporal adecvat frecvenței variabilităților fenomenologice implicate) a unei anumite regiuni a mediului investigat.

B. După numărul parametrilor monitorizați:

- **scanare uniparametrică** (ex.: determinarea lungimilor în măsurători dimensionale);
 - **scanare multiparametrică** (ex.: la scanarea din satelit, cu investigarea pe un spectru larg, până la 64 lungimi de undă diferite în aparatura spectrală cea mai performantă existentă în prezent).
- C. După tipul parametrului studiat:
- **scanare optică** ↔ simțul văzului;
 - **scanare în spectrul auditiv** ↔ simțul auzului;
 - **scanare mecanică** ↔ simțul tactil;
 - **scanare organoleptică** (temporală) – v. de exemplu investigarea spectrală a cineticii reacțiilor chimice (cu increment temporal) ↔ simțul mirosului sau/și al gustului;
 - **scanare termică**;
 - **scanare magnetică** ș.a.

Se observă că există traductori pentru tipuri de percepție care la om sunt nediferențiate, ființa umană avându-le ca potențialitate, fără a le fi dezvoltat încă în mod corespunzător (ex.: percepția streamerilor sau a fenomenelor de variație a micropotențialelor electrice de la suprafața pielii ș.a.).

- D. După gradul de intervenție în mediul considerat:
- **Scanare pasivă**: de investigare a mediului (pentru măsurare, citire, etc.);
 - **Scanare activă**: realizată în scopul modificării în sensul dorit a unei/unor proprietăți a/ale mediului de lucru, eventual după investigarea în prealabil a acestuia.

I.2. Dispozitivele de scanare (DS) laser

Se observă din cele prezentate extrema complexitate a subiectului care îmbrățișează domenii și aplicații ale cunoașterii dintre cele mai diverse.

Pentru a conferi studiului un caracter unitar și în același timp pentru a putea aborda tema într-un mod cvasiexhaustiv – cel puțin la nivelul cunoașterii actuale – pe un anumit tronson de aplicativitate, lucrarea de față se va centra pe scanarea de tip spațial, uniparametrică (în general pentru măsurători dimensionale), utilizând surse laser și traductori optici adecvați și, în general, fără modificarea parametrilor mediului investigat, așadar o scanare pasivă, de tip informativ.

“Palpatorul” optic, de fapt “elementul” care realizează scanarea, s-a ales un fascicul laser datorită proprietăților sale de intensitate și monocromaticitate, dar în primul rând de directivitate.

Clasificarea dispozitivelor de scanare (DS) laser:

- A. După numărul de dimensiuni ale obiectului scanat:
- **DS unidimensionale** (1D);
 - **DS bidimensionale** (2D);
 - **DS tridimensionale** (3D);
- B. După precizie:
- **DS de precizie:**
 - mică
 - medie

- înaltă,

Observație: din acest punct de vedere încadrarea într-o anumită clasă se face în mod diferit pentru fiecare categorie de aplicații.

C. După viteza de scanare (v):

- **DS lente** (v de ordinul cm/s);
- **DS cu viteze medii** (ex.: DS pentru măsurători industriale);
- **DS rapide** (ex.: imprimantele laser).

D. După tipul capului de scanare:

DS cu element: - **în mișcare de translație**

- **în mișcare de rotație:**

- **cu oglindă plană**

- **cu oglindă poligonală**

- **cama optică.**

- **în mișcare de oscilație** (DS de tip galvanometric).

- **rezonant**

- **prin refracția razei**

- **acusto-optic**

- **cu semiconductori**

- **holografic.**

E. După destinație:

- **DS de uz comercial** (ex.: scanarea codurilor de bare, înscricționări, verificatoare de etanșeizare acusto-optice ș.a.)
- **DS pentru aplicații industriale** (ex.: măsurători dimensionale, tehnici P.I.V.)
- **DS pentru măsurători de laborator** (ex.: microscopia prin scanare)
- **DS pentru investigații de teren:** terestre, aeriene sau din satelit (aplicații în geodezie, monitorizarea calității mediului, prospecțiuni ș.a.).

I.3. Structura tezei

Teza este structurată pe patru părți:

I. Stadiul actual în dezvoltarea tehnicilor și dispozitivelor de scanare cuprinde un prim capitol referitor la dispozitivele de scanare: variante și caracteristici principale. Se urmărește clasificarea obișnuită pe plan internațional, în dispozitive pentru “remote sensing”= scanare la distanță, respectiv scanare “input” și “output” (la mică distanță), respectiv care realizează măsurători (nu modifică parametrii mediului investigat) sau care acționează pentru modificarea mediului scanat (pentru înscricționări, stereolitografie, etc.). Ca o observație însă, clasificarea realizată în primele două paragrafe ale Introducerii este mai completă decât aceasta, mult uzitată însă în practică.

În Cap.2 se prezintă, tot din documentația existentă în domeniul scanării, câteva din principalele aplicații ale tehnicilor de scanare, conform clasificării realizate în Introducere, paragraful 2.

II. Analiza și sinteza dispozitivelor de scanare (DS) laser. Se parcurg două din cele mai importante tipuri de DS: cu oglindă plană sau poligonală rotitoare (Cap. 3), respectiv cu oglindă oscilantă (Cap. 4). Se realizează (Cap. 3), aspect ce constituie o parte originală a tezei, analiza matematică completă a părții reflectante a DS rotitoare, realizându-se apoi traiectul calculului de proiectare a variantei poligonale. Tot ca o contribuție originală, se dezvoltă o soluție care comportă o serie de avantaje față de ceea ce se practică în prezent: **cama optică**.

Dispozitivele de scanare oscilante, în varianta galvanometrică, fac obiectul Cap.4. Se realizează o variantă a cărei caracteristică de lucru să fie liniară și gradul de utilizare a timpului disponibil pentru procesul de scanare, să fie maxim.

III. Aplicații ale sistemelor de scanare laser. Se dezvoltă, în Cap.5, o variantă a DS bidimensionale (2D) în variantă galvanometrică (oscilantă). Se realizează de asemenea o soluție pentru scanarea tridimensională (3D).

În Cap.6 este considerat un obiectiv fundamental în analiza sistemelor optice (S.O.) care poate fi rezolvat prin utilizarea tehnicilor de scanare: vignetarea fasciculelor de lumină incidente în S.O. centrate.

Partea de analiză a procesului vignetații a dus la definirea unor concepte noi, cum sunt **coeficientul de vignetație fotometric**, iar în Cap.7, a **sistemelor optice multipupulare** și a **aperturii fotometrice**, care constituie o generalizare a mărimii cunoscute din optică sub numele de apertură numerică. De asemenea, s-a definit varianta generalizată a aperturii fotometrice: **coeficientul fotometric axial global**.

IV. Partea experimentală constă din verificarea pe cale experimentală a funcțiilor de scanare pentru unele din dispozitivele dezvoltate în Partea a II –a.

Lucrarea este completată corespunzător printr-o anexă cuprinzând Elementele de fotometrie necesare pentru studiul din cap. 6 și 7, respectiv printr-o anexă matematică ce cuprinde realizarea computerizată a aspectelor din lucrare care necesită o asemenea abordare.

Partea I

STADIUL ACTUAL ÎN DEZVOLTAREA TEHNICILOR ȘI DISPOZITIVELOR DE SCANARE

Capitolul 1

DISPOZITIVE DE SCANARE. CARACTERISTICI

1.1 Clasificări și aplicații

Comunitatea științifică internațională are [M2], în ceea ce privește scanerile, o viziune extrem de pragmatică, oarecum simplificatoare față de cea prezentată în clasificarea dispozitivelor de scanare (DS) din introducere. Astfel, se poate spune că există o divizare destul de netă realizată exclusiv pe **criteriul clasei de aplicații** în care este utilizat scannerul:

1.1.1. Scanarea la distanță (Remote sensing) constituie prima clasă de aplicații și cea în cadrul căreia au fost inițial aplicate, din punct de vedere istoric, scanerile.

Caracteristici: -scanarea este în general pasivă, de tip colectare de date;
-radiația utilizată este incoerentă și, în general, multispectrală.

Aplicații reprezentative:

- a) medicale:
 - cancer;
 - artrită;
- b) industriale:
 - managementul energetic;
 - defectoscopie termică;
 - defectoscopia circuitelor electronice;
 - testare nedestructivă;
- c) științifice:
 - studiul resurselor terestre;
 - meteorologie;
 - astronomie;
- d) de interes național:
 - incendii forestiere (monitorizarea apariției lor);
 - aplicații în poliție;
 - criminalistică;
 - operațiuni de salvare;
- e) militare:
 - dispozitive de ochire;
 - vedere pe timp de noapte:
 - tactică;
 - de navigație;

- rachete;
- operațiuni strategice (tip investigarea unor obiective din avion sau satelit);
- operațiuni de supraveghere.

Observație: Aparatura de acest tip a ajuns la performanțe, unele deosebite chiar față de nivelul științific și tehnologic prezent. De exemplu, sistemele de cercetare din satelit au ajuns, utilizând aparatura spectrală, la investigarea arealelor cercetate (inclusiv în profunzimea solului sau a oceanelor) într-o gamă de pînă la 64 lungimi de undă diferite.

Se pot face astfel investigații complexe, detectându-se simultan aspecte meteo, circulația curenților în oceane, gradul de poluare al aerului, apei, solului, starea vegetației (eventual monitorizarea apariției incendiilor), detectarea și studiul diverselor zăcămintele, situate la diverse adâncimi. Fiecare dintre acestea au o anumită “semnătură” spectrală, așadar pot fi studiate distinct.

Metode de scanare:

- **scanare “cadru”:** nu implică părți în mișcare (aspecte mecanice). Sunt realizate utilizând un senzor de tip rețea bidimensională de senzori. Aceștia sunt “citiți” utilizând fie mijloace electronice (de exemplu, CCD), fie optice (fascicule luminoase);

- **“pushbroom”:** prin deplasarea imaginii unei linii de fotodetectori de-a lungul suprafeței de investigat;

- prin metode mecanice: includ un DS uni (1D) sau bidimensional (2D), cuplat cu un fotodetector sau cu o rețea de fotodetectoare. Adesea, pentru realizarea unei scanări bidimensionale utilizând un DS 1D, a doua dimensiune necesară a scanării se realizează prin deplasarea platformei ce conține dispozitivul (mai rar, prin deplasarea obiectivului).

Exemplu: scanarea din avion, în care DS deplasează spotul perpendicular pe direcția de zbor, în timp ce a doua dimensiune a scanării este materializată prin însăși zborul aparatului (fig.1.5).

1.1.2. Scanere “input” și “output”/ ”pasive” și “active”

Sunt caracterizate, prin contrast cu scanerile de la distanță, care captează pasiv radiația primită de la obiect, de iluminarea obiectului sau mediului investigat cu un spot în deplasare rapidă, provenind de la un fascicul laser puternic colimat.

Aplicații reprezentative:

a) Scanere pasive (“input”)

- Scanarea imaginilor /Digitizare;
- Scanarea codurilor de bare;
- Inspecție optică;
- Recunoașterea optică a caracterelor;
- Citirea memoriilor optice;
- Artă grafică (citire);
- Microscopie prin scanare;
- Separarea culorilor;
- Vedere artificială (în robotică);
- Radar laser;
- Măsurători laser.

b) Scanere active (“output”)

- Înregistrarea imaginilor /Imprimante;
- Reproducerea culorilor imaginilor;
- Scanare în domeniul medical;
- Markere și gravare prin scanare;
- Recunoașterea înregistrărilor;
- Realizarea memoriilor optice;
- Fotolitografiere;
- Artă grafică (realizare);
- Înregistrarea datelor resurselor terestre;
- Afișarea datelor sau/și imaginilor.

a) **Scanerele pasive** sunt cele care înregistrează radiația laser împrăștiată pe un obiect țintă.

b) **Scanerele active** sunt cele care realizează înregistrări, înscricțiuni, afișări etc., radiația având un rol activ, de modificare a proprietăților locale a obiectului sau mediului-țintă.

În această din urmă categorie se încadrează:

- **scanerele cu tub de electroni** (cathode-ray tube: CRT);
- **scanerele laser**, având proprietățile cunoscute de monocromaticitate, direcționalitate și coerență.

În cele ce urmează, studiul se va focaliza asupra scannerelor laser, cele mai utilizate la ora actuală datorită performanțelor deosebite pe care le au.

Acest tip de scanere poate fi la nivelul său supus unei clasificări care a fost deja realizată în capitolul introductiv (§I2).

Esențial ar fi poate de remarcat aici un singur aspect și anume: clasificarea după poziția dispozitivului de scanare (DS) în sistemul optic în **scanere preobiective**, **obiective** și **postobiective**, după poziția pe care o are DS față de sistemul optic (SO) ce realizează focalizarea fascicolului, SO ce constituie obiectivul (Ob) (v. Fig.1.1).

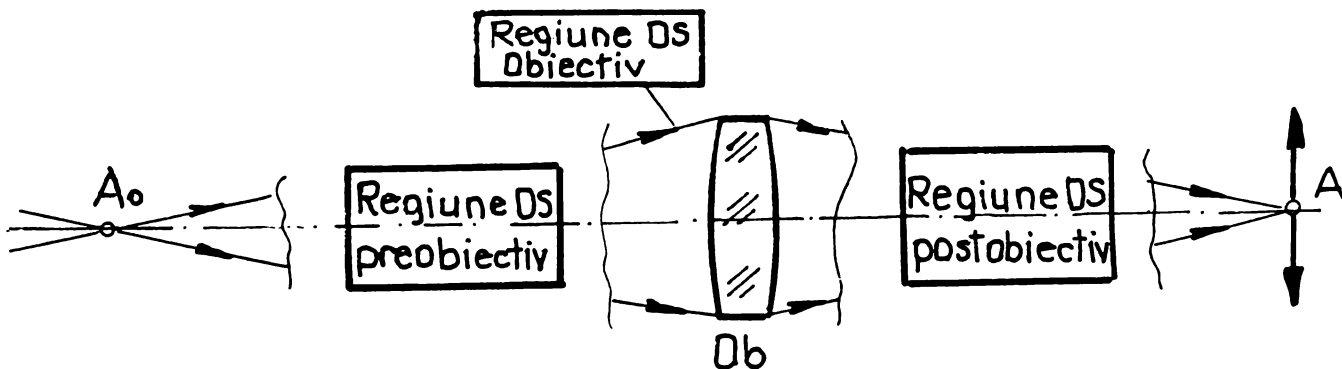


Fig.1.1 Dispozitivele de scanare (DS) clasificate funcție de poziția relativă față de sistemul optic obiectiv (Ob)

- **scanerele obiective** sunt cele în care diafragma de apertură (respectiv pupila de intrare) a Ob este deplasată liniar, scanând măsurandul (v. Microscopia prin scanare-Cap.2).

- **scanerile pre sau postobiective** sunt cele care acționează prin devierea unghiulară a unui fascicul laser incident fix (Cap.3,4,5), baleindu-se astfel spațiul vizat (1D, 2D, sau 3D).

Cele două tipuri de DS pot exista simultan sau separat în cadrul aceluiași sistem.

1.1.3. Mărimi caracteristice ale dispozitivelor de scanare

1) **Mărirea** în procesul de scanare se definește pentru dispozitive cu simetrie radială, care, pentru o rotație de unghi Φ a elementului în mișcare, produc o rotație θ a fascicolului laser emergent. Notată cu m , mărirea are expresia:

$$m = d\theta / d\Phi \quad (1.1)$$

Pentru $m = ct.$, $m = \theta / \Phi = : k$ - constanta de scanare.

Valoarea lui m se găsește uzual în intervalul [1,2], funcție de configurația de iluminare a scannerului. Valoarea maximă $m = 2$ se obține de exemplu în cazul oglinzii plane (Cap.3.1);

2) **Rezoluția** unui scanner este exprimată prin numărul N de elemente/spoturi luminoase care pot fi percepute distinct de-a lungul traiectului de scanare.

Diametrul δ a spotului se definește obișnuit la 50% din intensitatea sa maximă pentru o distribuție gaussiană a intensității, observație necesară pentru a cuantifica numărul N de asemenea spoturi pe unitatea de lungime. Există două **situații** distincte:

a) **scanarea liniară** cu un spot de diametru δ care execută o scanare de-a lungul unui domeniu S . Rezultă:

$$N = S / \delta \quad (1.2)$$

Se pot atinge rezoluții extrem de înalte, limitate practic doar de mărirea normală a vitezei de scanare. De exemplu, o imprimantă laser de înaltă rezoluție asigură $N=3000 \div 10000$, iar un scanner pentru grafică de înaltă rezoluție, $N=10000 \div 100000$.

b) **scanarea unghiulară** este caracterizată [B1] de:

$$N_{\theta} = \frac{\theta}{\Delta\theta} \quad (1.3)$$

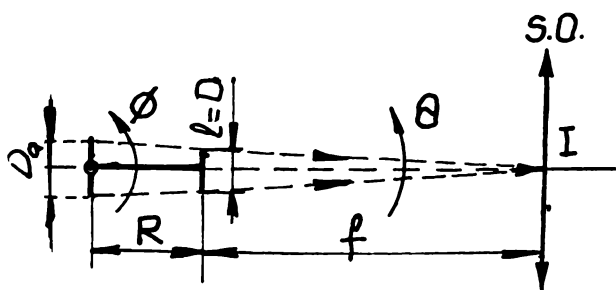


Fig. 1.2 Element de reflexie de lățime $l=D$ (de exemplu, latură poligon)

$$\Delta\theta \cong \sin \Delta\theta = a \frac{\lambda}{D_0} \quad (1.4)$$

unde λ este lungimea de undă a radiației monocromatice utilizate, D_0 este diametrul diafragmei de apertură, iar "a" factorul de formă al diafragmei de apertură, pe scurt, **factorul de apertură** – indicat în tabelul 1.1. pentru câteva forme uzuale de diafragmă.

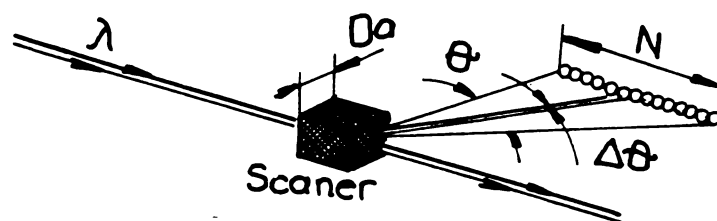






Fig.1.3 Deducerea rezoluției unghiulare

Factorul de apertură

Tab.1.1

Nr.	Forma diafragmei de apertură	Factorul de apertură a
1	 Rectangulară	1
2	 Rotundă	1,22
3	 Trapezoidală	1,5
4	 Triunghiulară	1,67

Din rel. (1.3) și (1.4) rezultă rezoluția:

$$N_{\theta} = \frac{\theta D_a}{a\lambda} \quad (1.5)$$

relația simplă, care se regăsește adesea în literatură [B1] sub numele de **ecuația scanării**.

Observație: Rezoluția poate fi mărită suplimentar “compunând” cele două aspecte tratate anterior (punctele a și b). De exemplu, din fig. 1.2, scriind:

$$D_a = D(1 + R/f) \quad (1.6)$$

Din ecuația (1.4) se obține, prin înlocuire:

$$N = \frac{\theta D}{a\lambda} \left(1 + \frac{R}{f}\right) \quad (1.7)$$

Această relație corespunde unei formule:

$$N = N_{\theta} + N_s \quad (1.8)$$

pentru rezoluție, cu implicarea atât a aspectelor unghiulare (date de rotația fațetei poligonului), cât și a celor liniare (date de deplasarea spotului incident pe oglindă datorită excentricității R a acesteia față de axa de rotație).

Observație: - ținând seama că deplasarea liniară a spotului este: $S \cong R \theta$, (1.9)

Din rel. (1.7) și (1.8), prin identificare, **diametrul spotului** rezultă:

$$\delta = \frac{a\lambda}{D} f \quad (1.10)$$

- factorul de amplificare a lui N_{θ} din rel. (1.7) devine unitar pentru $R=0$ (oglină plană conținând axa de rotație) sau pentru fascicolul colimat: $f = \infty$.

- factorul este supraunitar când fascicolul este convergent ($f > 0$) și subunitar pentru fascicol divergent ($f < 0$) – totul pentru cazul $R > 0$.

- aceeași discuție se poate realiza și funcție de R : factorul este supraunitar pentru $R > 0$ (reflexie pe suprafața exterioară a poligonului – situația obișnuită), respectiv subunitar pentru $R < 0$ (reflexie pe o porțiune interioară a unui poligon – oglinda de cealaltă parte a axei în fig. 1.2); discuția este realizată pentru $f > 0$ (fascicolul convergent).

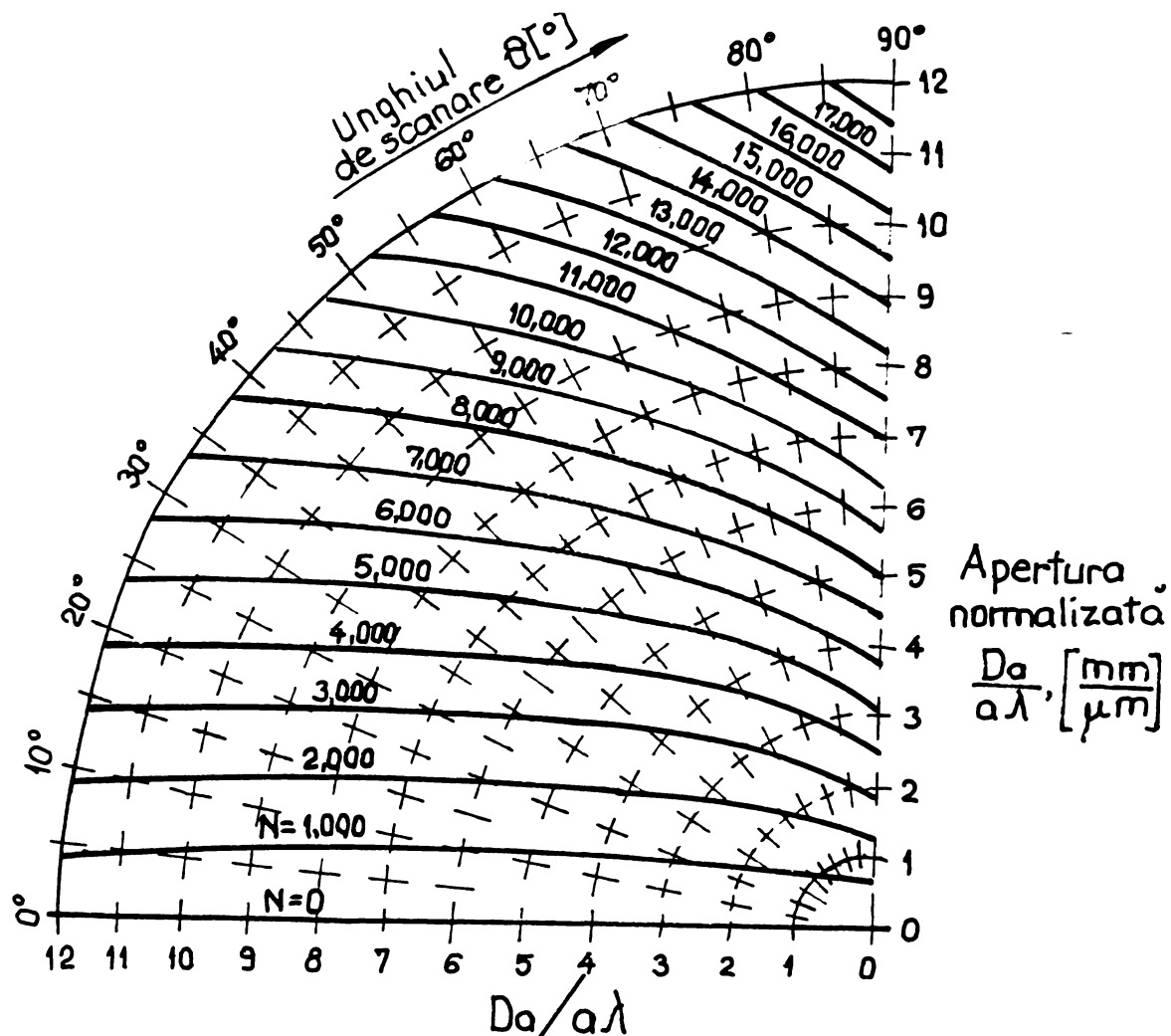


Fig. 1.4 Nomograma de determinare a rezoluției de scanare

Concluzie: În figura 1.4 este realizată [B1], pentru operativitate, o nomogramă de determinare a aperturii normalizate $D_a / a\lambda$ [mm / μ m], de exemplu, în funcție de unghiul de scanare θ [°], pentru a obține o anumită rezoluție $N = 0 \dots 17000$ impusă prin tema de proiectare.

Expresia generală a rezoluției se obține pentru cazul general în care unghiul Φ de rotație al elementului – oglindă, este diferit de unghiul de rotație θ al fascicolului.

Relația (1.7) este valabilă într-adevăr, doar pentru $\Phi = \theta$, adică pentru $m = 1 - v$. rel. (1.1).

În cazul general, se poate arăta că:

$$N = \frac{\theta D}{a\lambda} \left(1 + \frac{R}{mf} \right) \quad (1.11)$$

Particularizând, pentru $m = \theta/\Phi = \text{ct.}$, relația (1.11) dă o altă formă utilă a rezoluției:

$$N = \frac{\Phi D}{a\lambda} \left(m + \frac{R}{f} \right) \quad (1.12)$$

Factorul de amplificare relevă o amplificare mărită:

$$m' = m + R/f \quad (1.13)$$

care pentru poligonul prismatic devine:

$$m' = 2 + R/f \quad (1.14)$$

3) **Gradul de acoperire** (“duty cycle”) η este definit în literatura de specialitate ca procentul din perioada de scanare utilizat efectiv în procesul de scanare:

$$\eta = 1 - \tau/T \quad (1.15)$$

unde τ = intervalul de timp neutilizat pentru scanare, iar T este perioada de timp totală considerată.

Considerând simplificat mișcarea elementului de scanare (de fapt neliniară – v. Cap.3, 4), se poate spune că η limitează unghiul util care reprezintă domeniul de scanare:

$$\theta = \eta \theta_{\max} \quad (1.16)$$

unde θ_{\max} = unghiul total disponibil ca domeniu.

1.2 Scanarea la distanță

a) În figura 1.5 este prezentată scanarea la distanță pentru un avion ce zboară la înălțimea H cu viteza V . Domeniul de măsurare după direcția de scanare (a nadirului), perpendiculară pe direcția de zbor, este θ_{\max} . Dimensiunile unghiulare ale fascicolului de lumină ce realizează scanarea sunt $\Delta\theta$ după nadir și $\Delta\Phi$ după direcția de zbor.

Se observă efectul de distorsiune a spotului odată cu îndepărtarea de la verticala locului.

Se poate ușor demonstra că dimensiunile spotului sunt:

$$\begin{cases} \Delta x = H \cdot \Delta\Phi / \cos\theta \\ \Delta y = H \cdot \Delta\theta / \cos^2\theta \end{cases} \quad (1.17)$$

după direcția de zbor, respectiv după cea de scanare.

Rezultă o variație semnificativă a ariei spotului luminos pe suprafața pământului. De exemplu, pentru $\theta_{\max}=120^\circ$, aria este de aproximativ opt ori mai mare la extremitatea câmpului de scanare decât la verticala locului.

b) **Condiția de realizare a unei scanări continue** (de “acoperire” a întregului câmp de scanare) este ecuația de bază a procesului și pune în relație viteza navei și frecvența de scanare. Se poate astfel scrie distanța parcursă după direcția de zbor:

$$\Delta x = N_s \cdot H \cdot \Delta\Phi \quad (1.18)$$

unde N_s este numărul de scanări realizat în intervalul de timp Δt .

Prin împărțirea rel. (1.18) cu Δt , rezultă:

$$V/H = v \cdot \Delta\Phi \quad (1.19)$$

⇔ sensuri diferite de rotație a prismelor); k = raportul unghiurilor prismelor;
 Φ = defazajul la $t=0$.

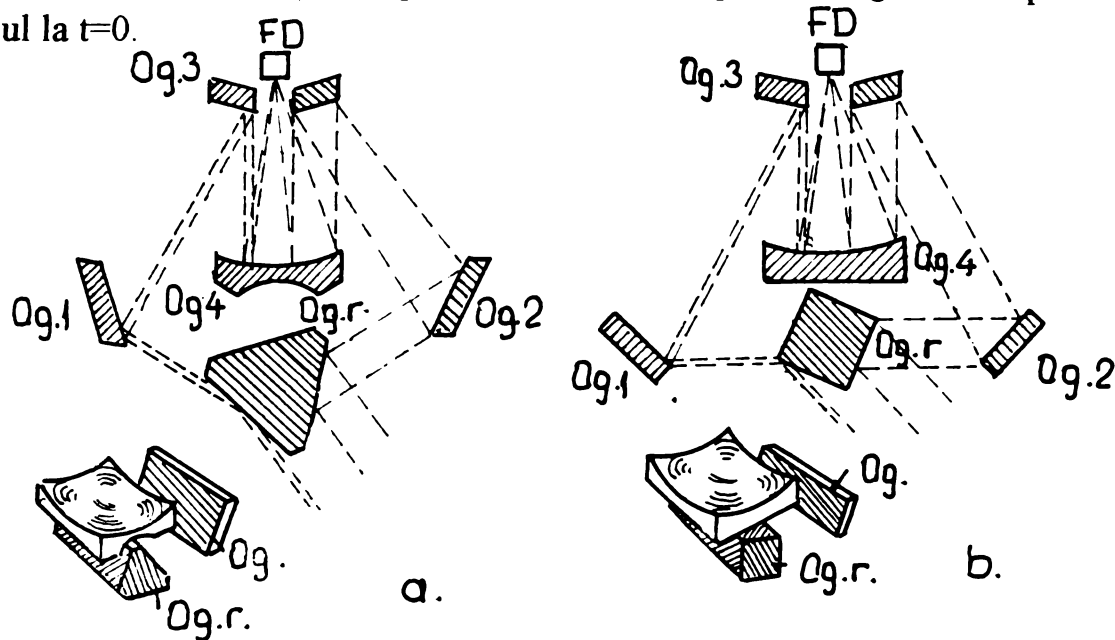


Fig. 1.7 Două variante de scanere cu (a) trei, respectiv cu (b) patru fețe pentru elementul în mișcare de rotație

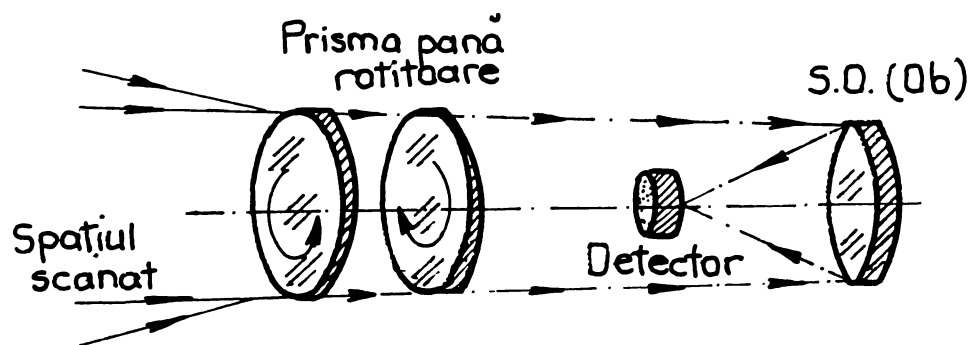


Fig. 1.8 Scanner cu prisme pană rotitoare (configurația de bază)

3.° Scanare circulară (Fig. 1.10): întreg sistemul optic se rotește în jurul nadirului cu axa optică înclinată cu unghiul Ψ . Avantajul acestui sistem este că, la o altitudine dată, aria suprafeței scanate este identică de-a lungul întregii circumferințe.

4.° Scanarea cu linie de FD (fotodetectoare): sistemul de scanare constă dintr-o linie de FD dispuse după direcția de scanare (perpendicular după direcția de zbor). Fiecare FD este citit pe rând și este ca și cum spațiul scanat ar fi parcurs de fascicul. Adesea, linia de FD este înclinată ușor, astfel încât intervalul de timp dintre utilizarea a două FD succesive să dea o imagine care este exact perpendiculară pe direcția de zbor.

Avantajul evident al acestei soluții este faptul că, în afară de platforma avionului sau satelitului, din care se face scanarea, nu mai există piese în mișcare.

5.° Scanere bidimensionale (2D): Sunt cele mai utilizate pentru studiul în infraroșu, în timp ce scanerile unidimensionale (1D) se utilizează predominant în investigațiile legate de studiul resurselor Terrei.

Există trei **configurații principale** de scanere 2D care se utilizează:

a) scanere cu oglinda poziționată în spațiul obiect:

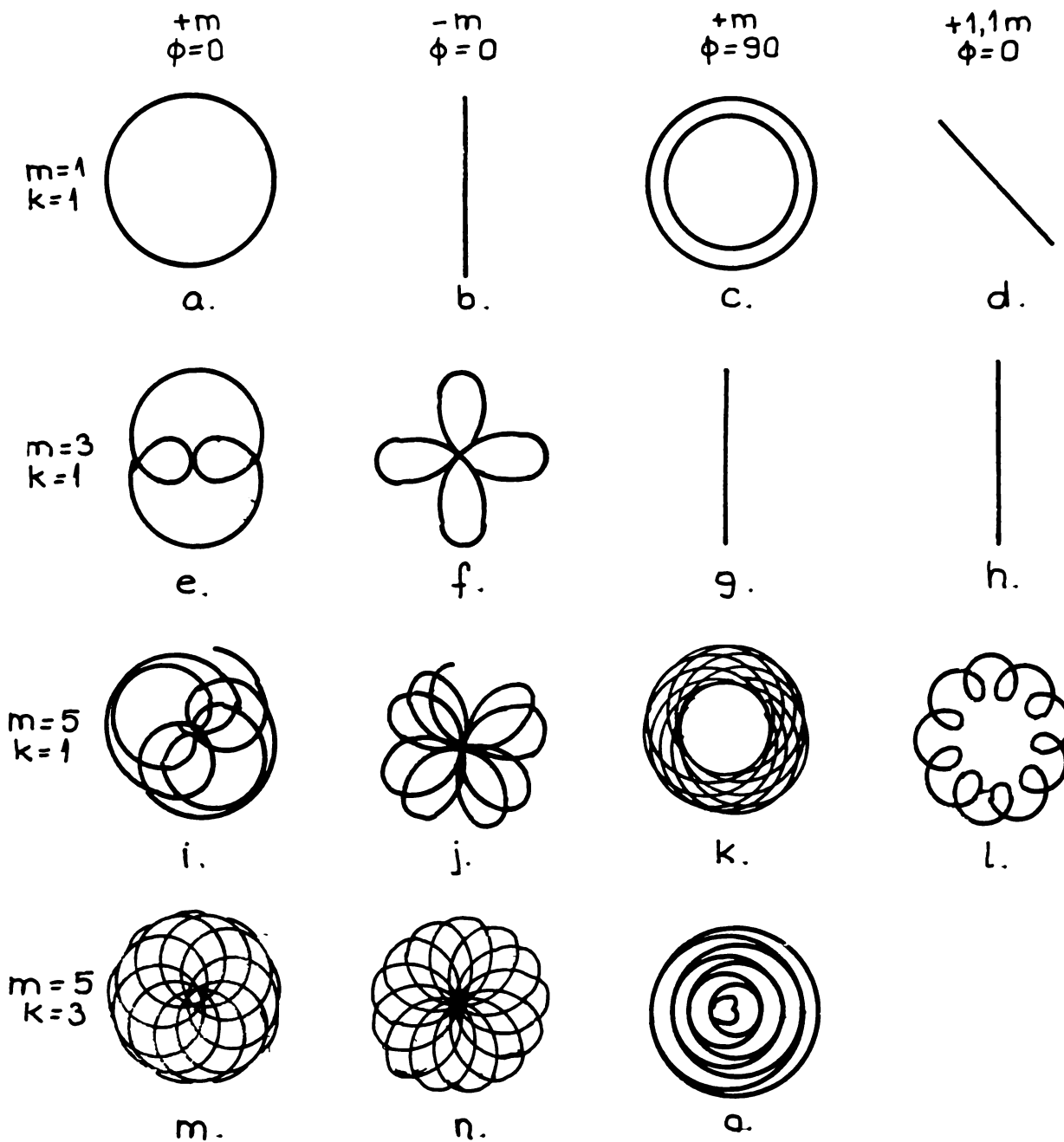


Fig. 1.9 Traiecte ale spotului laser pentru scannerul cu prisme pană rotitoare funcție de m , k , Φ

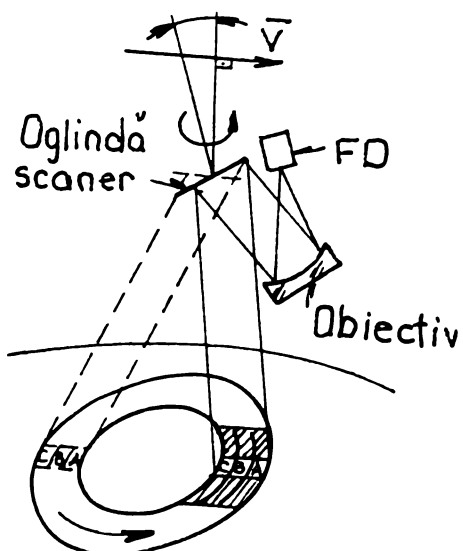


Fig. 1.10 Scanare circulară Pe suprafața Pământului

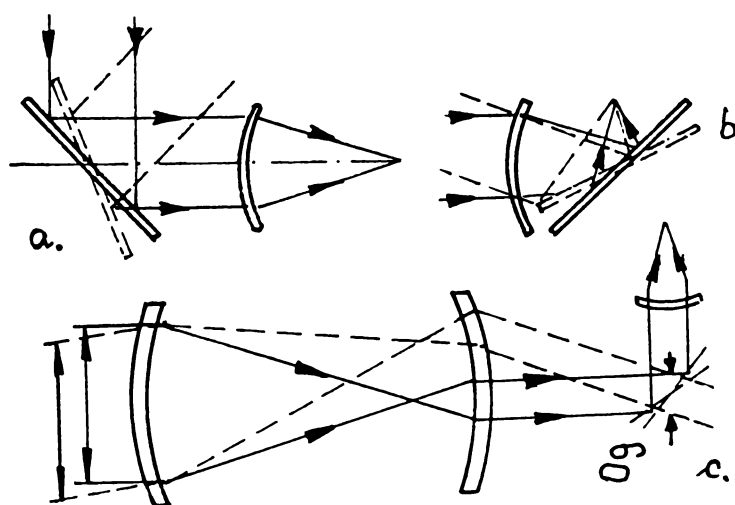


Fig. 1.11 Scanere bidimensionale (2D)

O variantă este ilustrată în Fig.1.11a, unde o oglindă plană captează fascicolul obiect, dirijându-l spre obiectiv. **Dezavantaje:** necesitatea unei aperturi mari a oglinzii (pentru a putea cuprinde spațiul obiect), respectiv dificultatea poziționării precise a unei oglinzi de mari dimensiuni.

b) **scanere cu oglinda în spațiul imagine:** oglinda mobilă este poziționată într-un fascicol convergent, așadar are gabaritul mai mic; în schimb va forma, tot din cauza aceasta, o imagine curbă dacă mișcarea sa nu va fi corectată (Fig. 1.11b);

c) **scanere cu fascicule paralele** (cu oglinda între subansamblurile optice): prin alegerea corespunzătoare a unui sistem telescopic anterior oglinzii, gabaritul acesteia se poate micșora corespunzător (Fig. 1.11c).

În continuare se vor parcurge câteva variante de **scanere 2D** realizate pe baza montajelor prezentate anterior.

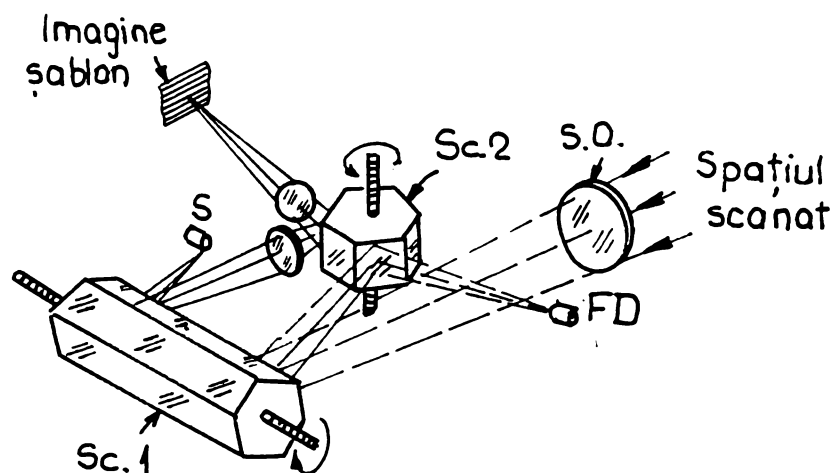
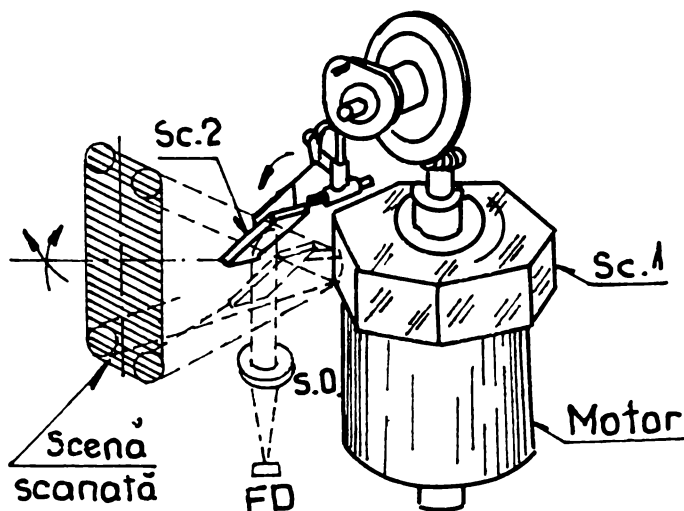


Fig.1.12 Scanner 2D cu oglinzi poligonale

A. Soluția (b) a dat naștere unei variante viabile de dispozitiv de scanare 2D (fig.1.12) în care scannerul 1 (Sc.1) parcurge încet spațiul scanat pe verticală, în timp ce Sc.2 asigură liniile de baleiere rapidă, orizontale. Dispozitivul realizează concomitent atât preluarea semnalului de la spațiul scanat, cât și realizarea unei

imagini – “raster” (șablon de baleiaj). Un dezavantaj al acestei variante îl constituie gabaritul mare al oglinzii Sc.1, necesar pentru a realiza ambele aspecte.



B. Varianta cu Sc.2 (ce asigură scanarea verticală) de tip oscilant elimină dezavantajul soluției anterioare, utilizând un element (oglinda oscilantă) cu gabarit redus (Fig. 1.13).

Fig.1.13 Scanner 2D de construcție compactă (cu o oglindă rotitoare și una oscilantă)

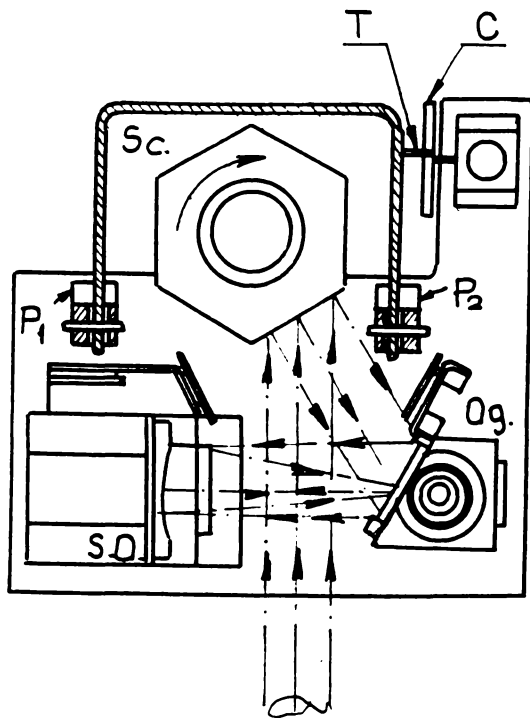


Fig. 1.14 Scanner cu oglindă poligonală basculantă

C. Cu oglindă poligonală basculantă (fig.1.14) care generează liniile de scanare orizontale, rotindu-se (cu un anumit increment unghiular) pe pivoții P_1 , P_2 , generând deplasarea pe verticală a liniei de scanare (cele două mișcări sunt, evident, corelate).

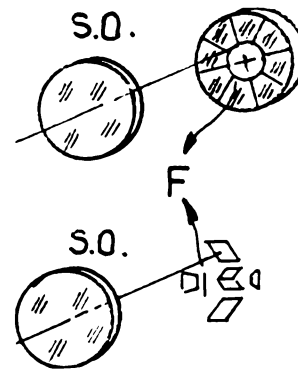


Fig. 1.15 Scanner disc multifacțat

D. Scanerul "disc" (fig.1.15) are fațetele înclinate după același unghi (spre centrul "farfurioarei"/discului), generându-se astfel imagini repetitive (mai multe scanări / s) ale mediului investigat sau cu unghiurile diferind (într-o progresie) unul față de celălalt, astfel că se înregistrează pe FD cadre alăturate ale câmpului investigat.

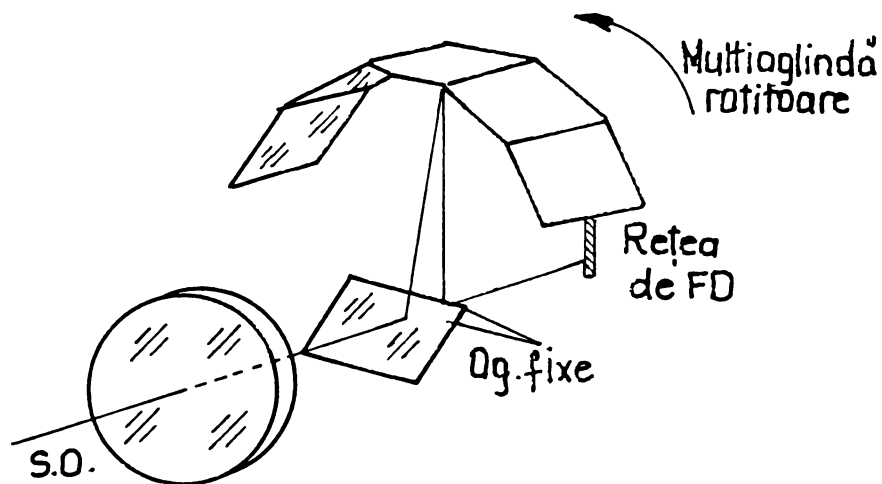


Fig. 1.16 Scanner carusel

E. Scanner "carusel" (fig.1.16).

6.° Scanere cu elemente refractive

- **prismatice** (fig.1.17): printr-o alegere corespunzătoare a coeficientului de refracție și a geometriei prisme, se poate realiza o focalizare bună pe FD la o deschidere a câmpului obiect cât mai mare.

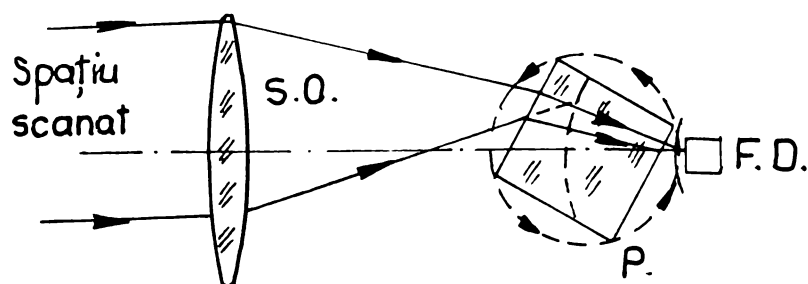


Fig. 1.17 Scanner cu prismă de refracție

- **lenticulare** (fig.1.18): se utilizează lentile cilindrice – sisteme anamor fote – astfel că se realizează două scanări ale spațiului obiect pe rotație (în figură sistemul lenticular este reprezentat în două poziții decalate cu 90° una față de cealaltă).

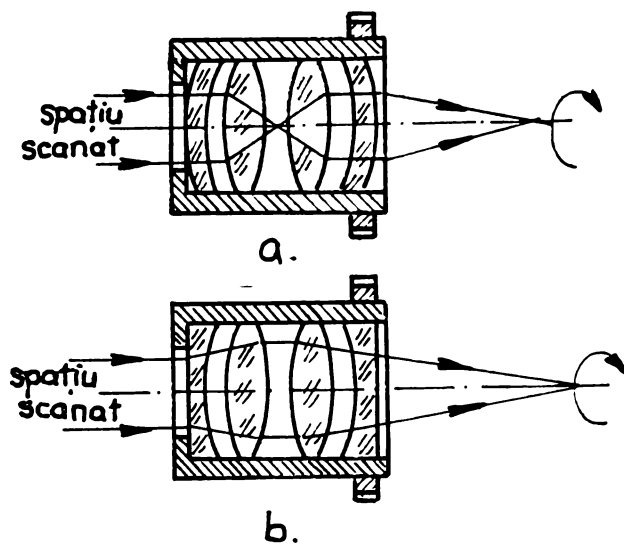


Fig. 1.18 Scanner refractiv lenticular

7.° Sistem în IR cu scanner galvanometric (fig.1.19): prin telescopul S.O.1 și scannerul galvanometric (oscilant) Sc., radiația IR este reflectată pe rețeaua de fotodectoare FD. De aici, radiația modulată este transmisă prin obiectivul Ob. la rețeaua de LED-uri. Prin S.O.3 (sistem de

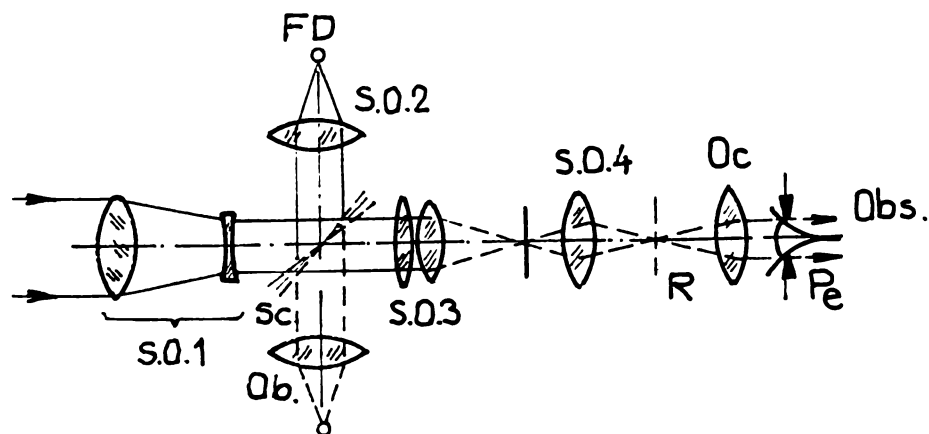


Fig. 1.19 Scanner în IR de tip galvanometric

focalizare), apoi S.O.4 și ocularul Oc., radiația vizibilă emisă de LED-uri modulată după radiația IR provenind din spațiul obiect este adusă spre observator (Obs.).

8.° Scanere cu fascicule paralele: pot fi (fig.1.20):

- cu oglindă poligonală rapid rotitoare (Sc.2) și scanner oscilant (Sc.1);
- cu scanner oscilant și disc cu oglinzi în mișcare de rotație, (fig.1.21).

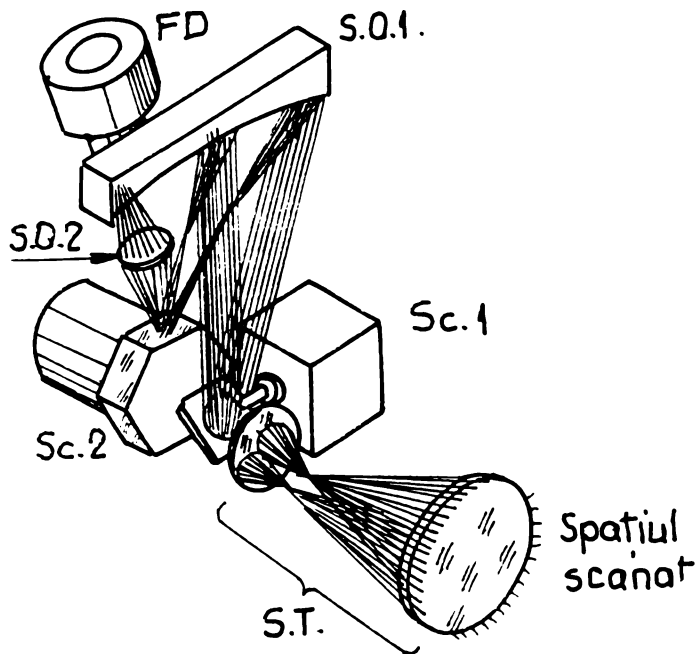


Fig. 1.20 Scanner cu fascicule paralele (2D) cu o oglindă poligonală și una galvanometrică

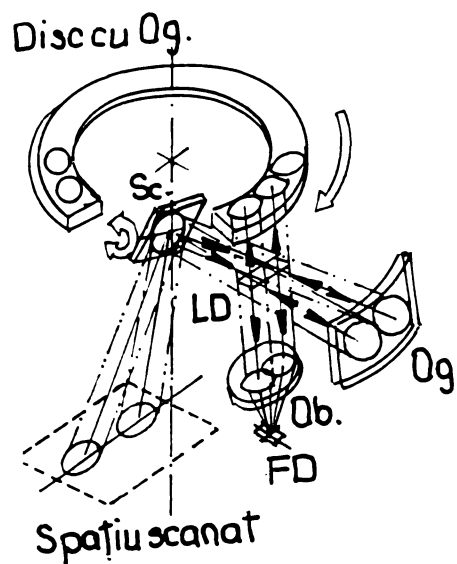


Fig. 1.21 Scanner cu fascicol paralel (2D) cu disc cu oglinzi

1.3. Scanere "input" și "output" (pasive și active)

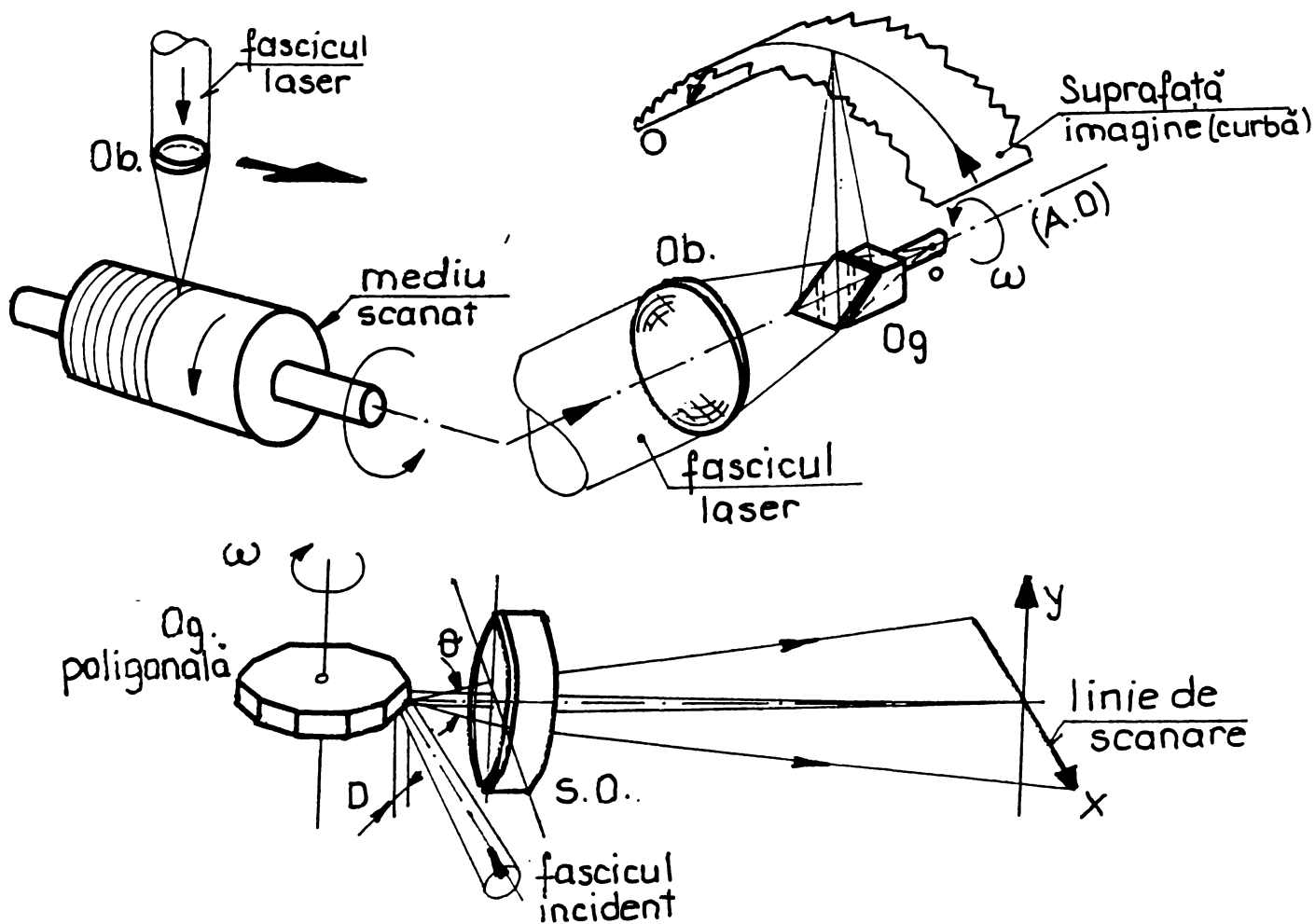


Fig. 1.22 Scanner input/output: a) obiectiv; b) preobiectiv; c) cu oglindă monogon

În fig. 1.22 sunt prezentate câteva variante de scanare de acest tip – care palpează obiectul sau spațiul parcurs de la mică distanță:

a) scaner obiectiv, cu Ob. și fascicolul laser în mișcare relativă față de mediul de stocare a informației (mediul scanat);

b) scaner preobiectiv cu oglindă poligonală: fiecare fațetă a oglinzii asigură o scanare cu o anumită amplitudine unghiulară. Fascicolul emergent din obiectiv, focalizat, parcurge un segment de dreaptă;

c) scaner cu oglindă monogon rotitoare. În acest caz, punctul de focalizare a fascicolului are o traiectorie după un arc de cerc. Soluția are avantajul de a putea utiliza un obiectiv foarte simplu (unilenticular), procesul rezultând teoretic lipsit de aberații.

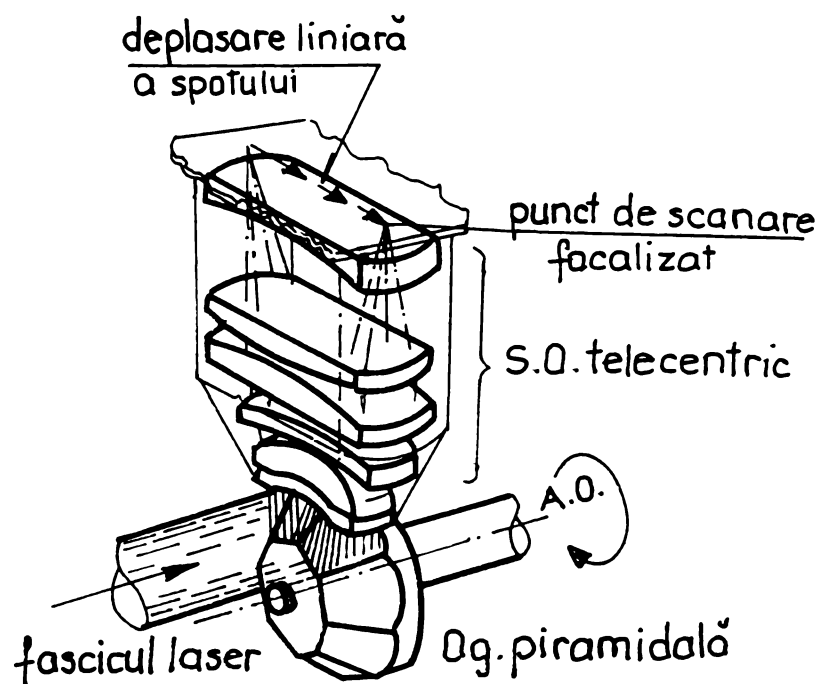


Fig.1.23 Scaner piramidal cu S.O. telecentric (scanare în linie)

Observații:

1) O problemă fundamentală a scanerelor este necesitatea de a realiza în general scanarea în linie dreaptă, nu în arc de cerc. Această problemă se rezolvă obișnuit prin utilizarea unor sisteme optice refractante cu 2÷7 sau chiar mai multe lentile cu un număr posibil egal de indici de refracție diferiți, cu 4÷14 suprafețe cu 3÷8

sau mai multe spații [34] între lentile, fiecare din aceste aspecte constituind “gradele de libertate” oferite proiectantului sistemului optic.

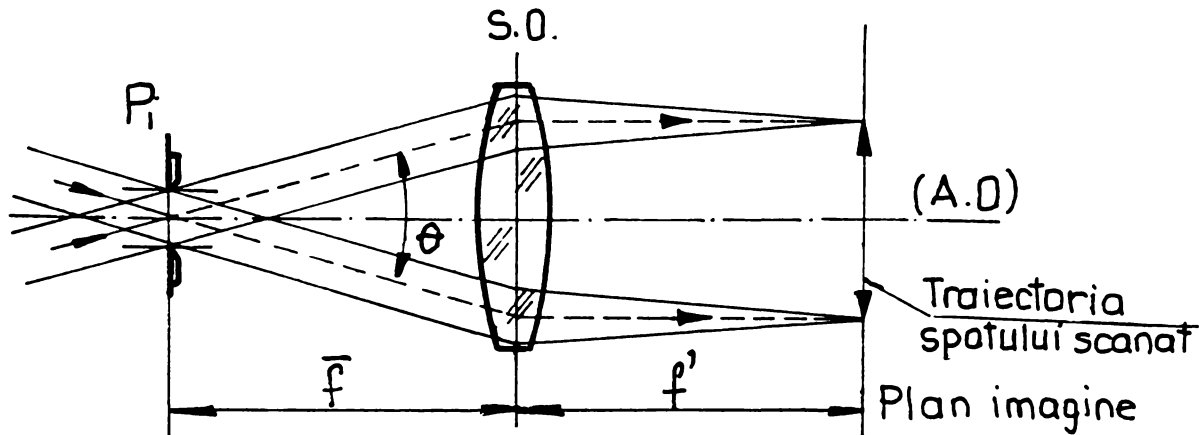


Fig. 1.24 Traiectul spotului de scanare pentru S.O. telecentric

2) În fig. 1.23 este reprezentat un asemenea S.O., însă telecentric de înaltă performanță, cu 6 elemente, care transformă deplasarea unghiulară a fascicolului incident într-o deplasare liniară a spotului laser focalizat. În fig. 1.24 este reprezentat schematic traseul razelor de lumină în acest caz. Se observă principalul dezavantaj al soluției: necesitatea ca S.O. să aibă în planul de scanare o dimensiune mai mare chiar decât câmpul scanat, ceea ce ridică problema de proiectare și execuție. Avantajul variantei este focalizarea strictă a spotului în planul imagine și posibilitatea obținerii autoreflexiei de pe proba scanată pentru calibrarea internă a dispozitivului.

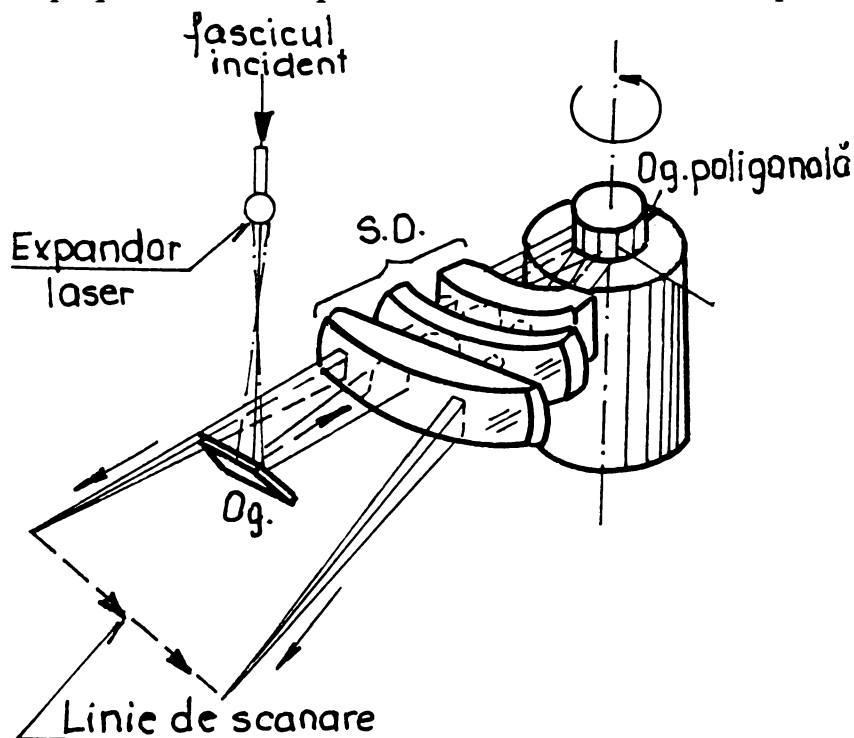


Fig. 1.25 Oglindă poligonală în scanner cu “dublă trecere”

3) Scanarea “cu dublă trecere” este o altă funcție posibilă a sistemului lenticular. În fig. 1.25 fascicolul laser, subțire, este expandat și dirijat de oglinda fixă (Og.) pe oglinda poligonală rotitoare, cuprinzând două fațete ale acesteia. În acest fel, parcurgerea liniei de scanare se face cu spot dublu. În acest caz fascicolul incident și convergent trebuie fiecare ușor decalat față de planul de simetrie al S.O., pentru a evita

obstrucționarea fascicolului emergent de oglinda fixă (Og.) inițială. Dezavantajul se elimină prin utilizarea unor alte soluții, cu utilizarea unei oglinzi dispuse lateral față de traiectul razelor de scanare.

1.4. Tipuri de dispozitive de scanare

Tehnicile de scanare la distanță și cele “input” / “output” sunt în bună măsură interschimbabile. Caracteristicile lor pot fi efectiv comparate inversând sensul razelor de lumină, respectiv poziția sursei și detectorului. Scanarea pre și postobiectiv își găsesc astfel corespondența în scanarea realizată în respectiv spațiul obiect și spațiul imagine. O distincție clară, totuși, este obținerea sub sau suprailuminării pupilei în scanarea input/output, pe când în scanarea la distanță pupila are de obicei extensia maximă pentru a colecta cantitatea maximă posibilă de flux luminos disponibil de la o sursă îndepărtată. Rezultă de aici atenția sporită care se acordă factorului de apertură în scanarea input/output, pe când în scanarea la distanță, acesta își pierde din importanță.

O altă diferență este dată de utilizarea unui spectru larg de lungimi de undă în scanarea la distanță, pe când cea input/output utilizează surse mono sau maximum policromatice (cu un număr finit de lungimi de undă disponibile). Diferența este însă mult atenuată de tendința, tot mai generală, de a utiliza module reflectante în ambele tipuri de sisteme de scanare.

În continuare se vor trece în revistă principalele tipuri de dispozitive de scanare, considerate de această dată nu după criteriul aplicativ, ci după cel al principiului de funcționare.

1.4.1. Scanere poligonale

Pot fi realizate în variantă poligonală, ca poligon regulat cu n laturi (în particular, $n=1$ și se obține varianta monogon) – fig.1.26 sau în varianta piramidală – fig.1.27.

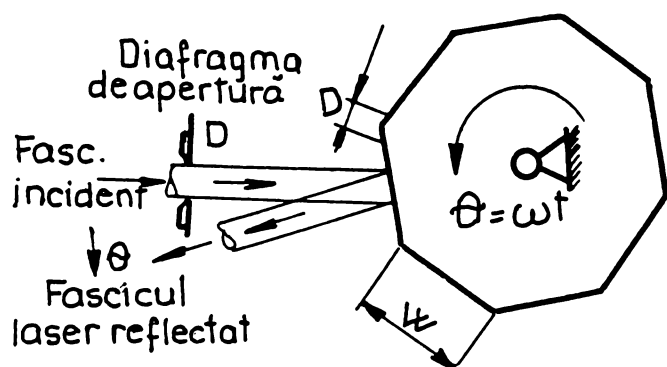


Fig. 1.26 Scanner poligonal

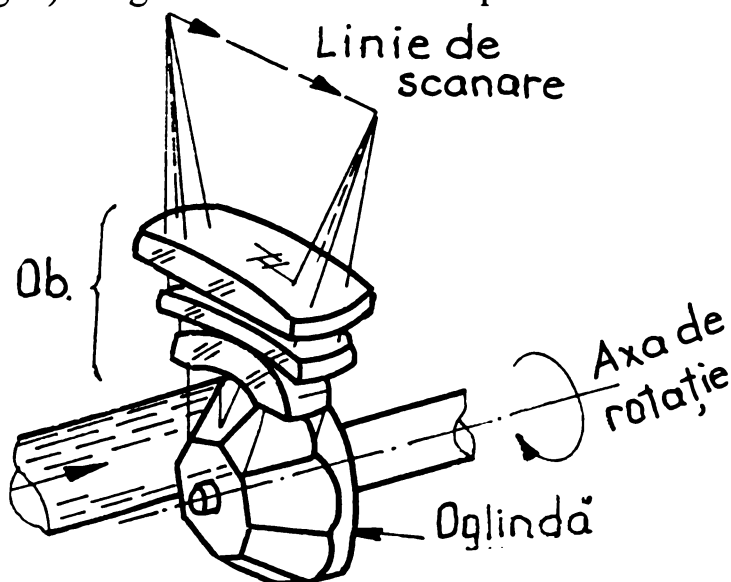


Fig. 1.27 Scanner piramidal

Variantele cu $n = 1$, cu oglindă poligonală sau prismatică sunt prezentate respectiv în fig. 1.6 a) și b).

Caracteristici comparative: Varianta piramidală are avantajul posibilității de a așeza oglinda în vecinătatea S.O. refractant, rezultând o construcție mai compactă, pe când varianta clasică, poligonală, necesită un spațiu distinct de rotație a poligonului.

În tab.1.2 sunt date câteva caracteristici comparative ale celor 2 variante:

Privire comparativă asupra scanerelor rotitoare

Tab.1.2

Nr.	Caracteristica	Tipul scannerului	
		Piramidal	Poligonal
1.	Direcția fascicolului incident ¹⁾	Simetric radial (obișnuit, paralel cu axa)	Perpendicular cu axa
2.	Direcția fascicolului emergent ¹⁾	Unghi arbitrar cu axa (obișnuit însă, unghi drept)	Perpendicular cu axa
3.	Constanta de scanare	1	2
4.	Unghiul de scanare maxim	$2\pi / n$	$4\pi / n$
5.	Rotație a fascicolului emergent față de axă	da	nu
6.	Forma fascicolului (variantea suprailuminată)	Triunghiulară (sau trapezoidală)	Rectangulară
7.	Mărirea dimensiunii fascicolului în direcția de scanare	nu	da
8.	Erori datorită abaterilor axiale	da	nu
9.	Erori datorită abaterilor radiale	da	da
10.	Costul de fabricație	mai mare	mai mic

1) față de axa de rotație

Se observă că unghiul de scanare este, pentru varianta poligonală, de 2 ori mai mare decât cel pentru varianta prismatică, la o aceeași rotație a oglinzii.

Gradul de acoperire este, pentru diametre finite (d_f) ale fascicolului laser:

$$\eta = 1 - \frac{d_f}{l} \quad (1.24)$$

unde l este mărimea laturii poligonului. Cu observația că se poate utiliza varianta cu dublă scanare – v. fig1.27, rezultând astfel un η supraunitar.

Rotirea fascicolului este o problemă care se poate pune adesea la utilizarea variantei prismatice dacă fascicolul este (de exemplu) polarizat. Aspectul este evitat pentru varianta poligonală, la care procesul de scanare ridică probleme doar prin posibila vignetație a fascicolului incident sau, eventual, prin posibilele modificări ale coeficientului de reflexie cu unghiul de incidență.

În cazul în care rotirea axei fascicolului este totuși prezentă, se includ în sistemul optic sisteme de redresare a imaginii (prismatice sau lenticulare) [N4] care însă (vezi o prismă Dove, de exemplu), trebuie să se rotească cu o viteză unghiulară de două ori mai mică decât a elementului de scanare.

Analiza și sinteza acestor dispozitive (calculul de proiectare) este o problemă care va fi tratată în detaliu, într-o dezvoltare matematică cât mai completă, în Cap.3.

În cele ce urmează se vor prezenta așadar doar câteva **considerații preliminare** referitoare la acest calcul (v. fig. 1.26):

- mărimea și costul sistemului optic refractant (S.O.) este funcție de distanța față de scanner (L , fig.3.7) și de unghiul total de scanare cerut (deschiderea unghiulară dintre razele extreme: inferioară și superioară ale domeniului de scanare). Un unghi mai mare impune un calcul mai complex pentru corectarea aberațiilor datorită înclinării fascicolului și necesității obținerii unui traiect liniar al spotului laser;

- un unghi mai mare are, pe de altă parte, avantajul reducerii preciziei cerute la amplasarea pixelilor (spațiați inegal de-a lungul liniei de scanare, funcție de funcția de scanare $h(\theta)$ – fig.3.9 – neliniară, astfel încât funcția de scanare $h(t)$ să rezulte liniară);

- numărul de fețe n al poligonului, funcție de dimensiunea și viteza unghiulară a acestuia se regăsește în calculul realizat în §3.1. De asemenea, n poate rezulta din “ecuația scanării”-rel. (1.5).

Exemplu: Fie un scanner rotitor care lucrează cu un laser heliu-neon, cu $\lambda=633\text{nm}$ și un diametru la oglindă $D_a = 5 \text{ mm}$. Presupunând (ipoteza simplificatoare – v. §3.2) că o fațetă a oglinzii este iluminată de raza laser corespunzător domeniului de scanare util pe o jumătate din unghiul la centru care subîntinde o latură, adică $\theta=2\alpha=2\pi/n$ (v. §3.2), impunându-se prin tema de proiectare $N_\theta=1000$, se obține:

$$N_\theta = \frac{\theta D_a}{a\lambda} = \frac{\theta \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{633 \cdot 10^{-9}} \Rightarrow \theta = 7,25^\circ$$

Considerând $\theta = 9^\circ$, rezultă atunci: $n = 2\pi / \theta = 40$ fațete.

1.4.2. Scanere holografice

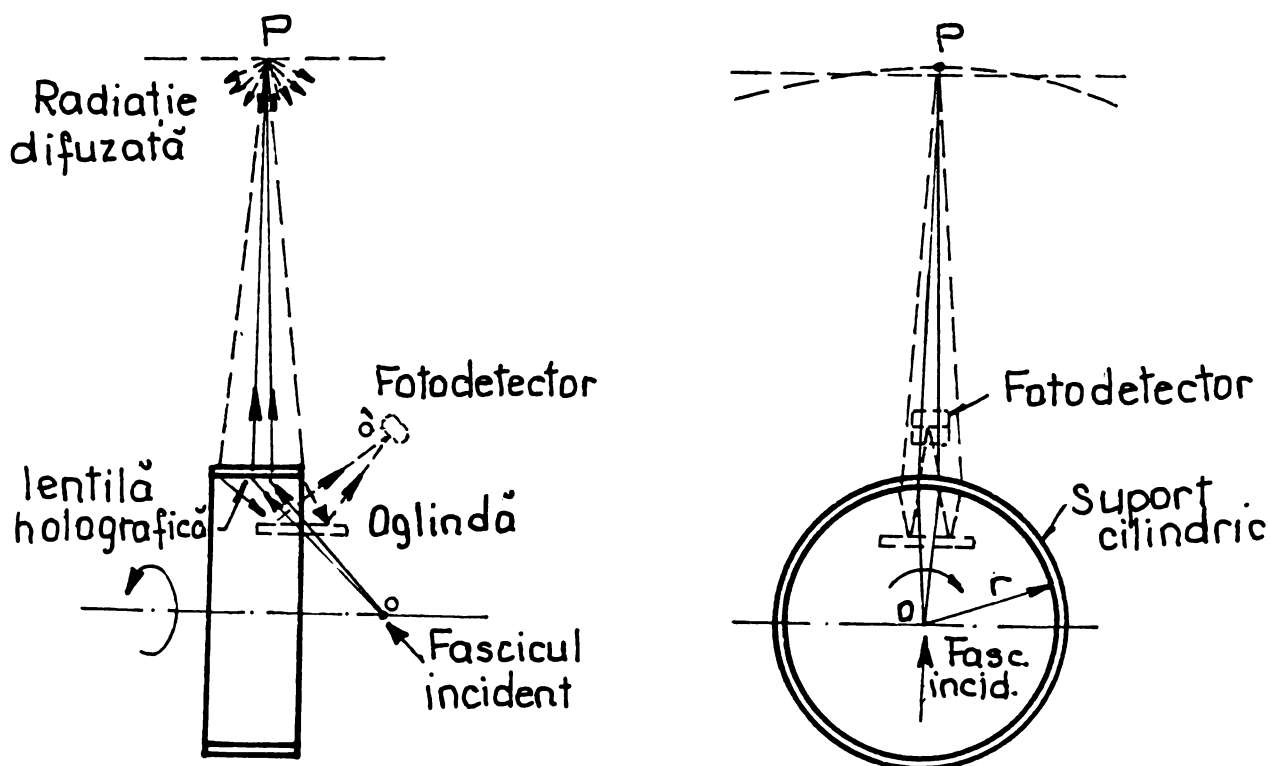


Fig.1.28 Scanner holografic cilindric prin transmisie

Principiul de funcționare. Caracteristici generale: Majoritatea scanerelor holografice sunt realizate dintr-un corp rotativ dotat cu o rețea de elemente holografice dispuse ca și fațete (Fig.1.28), analog unui scaner cu oglindă poligonală sau dispuse axial – simetric (Fig.1.29), analog unui scaner piramidal.

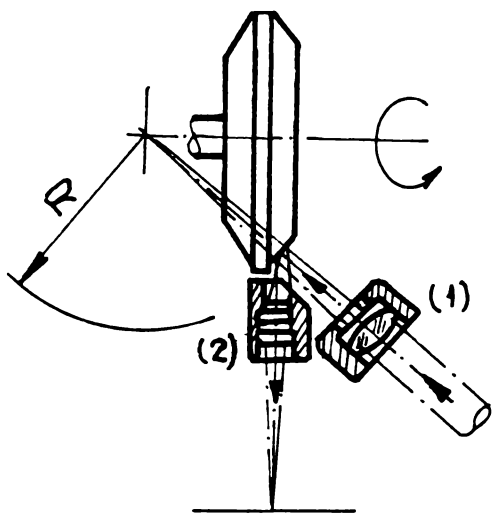


Fig.1.29 Scaner holografic piramidal prin reflexie

Legile de scanare sunt analoage cu scanerile piramidale sau cu cele de tip poligonal rotativ (§1.41) după soluția constructivă aleasă.

Numărul n de fațete este determinat tot de unghiul total de scanare (dimensiunea unghiulară a spațiului de scanare) și de gradul de acoperire η necesar (§1.41). Rezoluția este determinată de dimensiunea fascicolului incident și de unghiul de scanare - rel. (1.5).

Avantajele scanerelor holografice:

- reducerea încărcării și rezistenței aerodinamice prin eliminarea discontinuităților radiale ale corpului rotitor;

- reducerea defomațiilor inerțiale (prin eliminarea variațiilor dimensionale radiale);

- filtrarea în condițiile recolectării

fascicolului (Fig.1.28), permițându-se astfel o selecție, atât spațială, cât și spectrală, prin redifracție;

- posibilitatea operării în lumină transmisă, cu un coeficient de transmitere ridicat al luminii;

- posibilitatea ajustării orientării, dimensiunilor și focalizării fațetelor individuale.

Dezavantajele scanerelor holografice:

- necesitatea unor proceduri de proiectare și fabricație speciale, cu expertiză specializată în optică difractivă, metrologie și procesare chimică;

- necesitatea considerării modificării lungimii de undă: realizarea hologramei se face cu o lungime de undă, iar reconstrucția imaginii (operarea efectivă a sistemului), cu altă lungime de undă (λ).

Ecuția de propagare pentru primul ordin de difracție se scrie:

$$\sin \theta_i + \sin \theta_e = \lambda / d \quad (1.25)$$

unde θ_i , θ_e sunt respectiv unghiurile de incidență și emergență (față de normala la suprafața rețelei), iar d este pasul rețelei.

În consecință, rețeaua va da un fascicul colimat de lungime de undă schimbată (λ), la un unghi modificat (θ_e).

Situația se complică suplimentar la operarea în regim nemonocromatic, chiar utilizând tot rețele plane.

De asemenea, o posibilă sursă de erori o va constitui, din cele expuse, cea mai mică eroare de realizare a lungimii de undă λ cu care se lucrează. Fiecare dispozitiv trebuie așadar corectat individual, luând în considerare posibilele modificări ale lungimii de undă ale diodei laser cu care lucrează.

- variantele care nu sunt axial simetrice dau naștere la interacțiuni complexe care necesită reglări fine pentru a obține o caracteristică de scanare liniară, domeniul de scanare dorit, uniformitate radiometrică și insensibilitate la polarizarea fascicolului incident.

Soluții constructive:

1) scaner holografic cilindric prin transmisie (Fig. 1.28):

Într-un suport cilindric de sticlă sunt montate echidistant "n" lentile holografice. Fascicolul laser emis din punctul O, de pe axa de rotație (montajul va avea așadar o simetrie axială) este difuzat în punctul P, acest punct urmărind o traiectorie circulară în jurul axei.

O parte din radiația difuzată din P este interceptată de lentila holografică și reflectată pe un fotodetector situat în punctul imagine O' al punctului sursă O.

2) scaner holografic tronconic prin reflexie (Fig. 1.29):

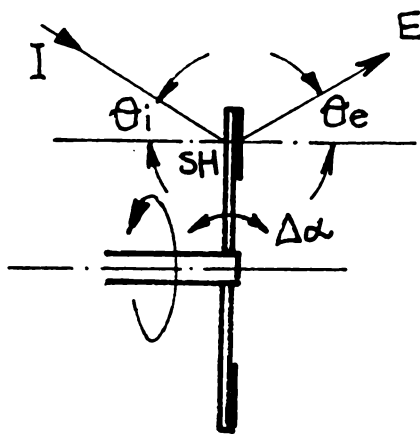
Provine din varianta piramidală, fațetele fiind curbate, cu raza R.

Grupul de lentile (1) produc un fascicul colimat care este scanat prin sistemul optic (2) pe suprafața de analizat.

Avantaj: Este varianta care, pînă în prezent, a oferit cele mai ridicate performanțe din punct de vedere al ambelor criterii de calitate: rezoluție (20.000 linii/scan) și viteză (200 Mpixeli/s). (Aparat aflat în prezent în custodie permanentă la Institutul Smithson).

3) scaner holografic în regim Bragg ($\theta_i = \theta_e$):

Această variantă a dus, de la introducerea ei, începînd chiar cu anii '70, la realizarea celor mai importante progrese în ceea ce privește configurarea sub formă de disc a scanerelor.



În varianta prezentată în figura 1.30, fascicolul incident (I) și cel emergent (E) sunt raze principale, raza emergentă fiind refractată sub unghiul θ_e , în timp ce raza I este incidentă sub unghiul θ_i față de normala la disc.

O problemă esențială care se pune pentru această variantă este compensarea erorii de poziționare (de înclinare) a sectorului holografic SH, $\Delta\alpha$. Eroarea în unghiul de emergență pentru o deviație elementară $d\alpha$ se scrie:

Fig. 1.30 Scaner holografic în regim Bragg (scaner disc)

$$d\theta_e = \left[1 - \frac{\cos(\theta_i + \Delta\alpha)}{\cos(\theta_e - \Delta\alpha)} \right] d\alpha \quad (1.26)$$

Se observă că, pentru funcționarea normală, în regim de simetrie perfectă (regim Bragg), cu $\theta_i = \theta_e$, eroarea cauzată de $\Delta\alpha$ este efectiv anulată.

O analogie a acestei proprietăți importante poate fi dezvoltată pentru înclinarea unei prisme pană refractive operînd în regim de deviație minimă.

Montajul din figura 1.31 cu $\theta_i = \theta_e = 45^\circ$ se regăsește în aplicații care au o bună precizie, cum ar fi **printarea laser** (Cap.2). Soluția implică corecția complexă a

erorilor prin utilizarea lentilelor holografice, ceea ce duce la corecția abaterilor în λ ale diodei laser și la o iluminare corespunzătoare a liniei de scanare.

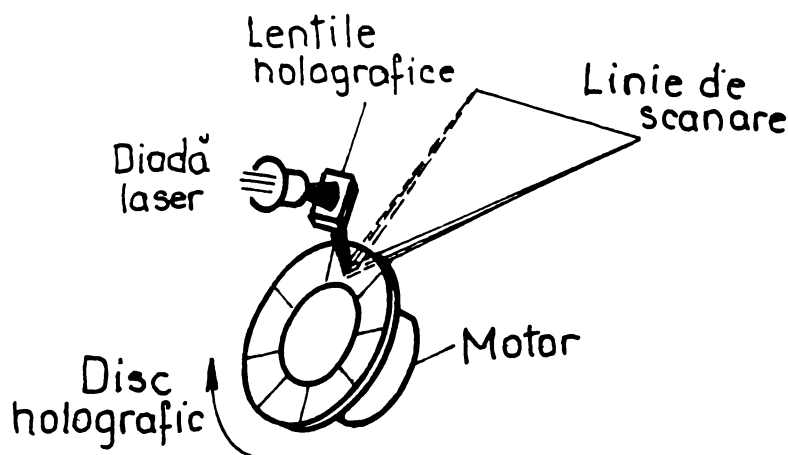


Fig.1.31 Scaner holografic de tip disc

Dezavantajul soluției constă în cerințele de centrare riguroase și în necesitatea ponderării atente a caracteristicilor funcționale, adesea contradictorii, pentru a putea satisface o anumită temă de proiectare.

1.4.3. Scanere galvanometrice

Fac parte din clasa scenerelor oscilante (v. Fig.1.32 și 1.33).

Avantaje:

- evitarea problemelor produse de erorile de poziționare ale fațetelor oglinzilor multiple specifice scenerelor poligonale sau celor holografice;
- mărirea valorii gradului de acoperire η .

Soluții constructive: Prin reducerea fațetelor poligonului la una, poligonul devine un monogon.

Aceasta duce la dezvoltarea câtorva **soluții principale:**

A. Funcție de configurația spațiului de scanare:

- cu spațiu de scanare de tip cilindric, avantajul este realizarea unui grad de acoperire η și a unui domeniu unghiular de scanare cu valori foarte mari;
- cu scanare plană, utilizând un sistem optic refractiv corespunzător. Domeniul unghiular este mai mic decât în primul caz, dar, față de soluțiile rotative, η poate fi făcut cvasiunitar.

B. Funcție de principiul de antrenare al echipajului mobil:

- scanere galvanometrice;
- scanere rezonante;
- scanere piezoelectrice.

1) Scanerul galvanometric propriu-zis (Fig.1.32):

Principiul de funcționare și soluția constructivă sunt binecunoscute din teoria aparatelor de măsurare [P5]. – O dezvoltare a acestor aspecte, împreună cu propriile contribuții în domeniu, este realizată în Cap.4.

Caracteristici:

- Domeniul unghiular de scanare este egal cu dublul unghiului de oscilație al echipajului mobil;

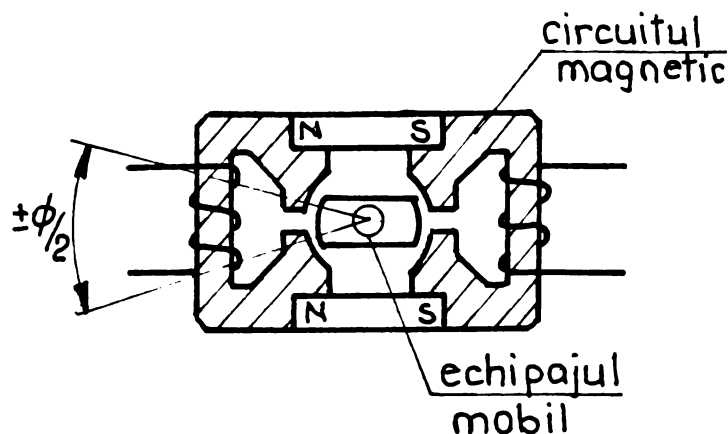


Fig.1.32 Scanner galvanometric

- Amortizarea este suficient de mare pentru a putea fi asigurată funcționarea într-un domeniu larg de frecvențe, de la zero pînă la o limită apropiată de cea de rezonanță;
- Caracteristica de funcționare $\theta(t)$ (Fig.1.34) are o porțiune liniară, mai lungă și una de revenire, de durată τ (curba continuă);
- Inerția dispozitivului este redusă, el permițînd poziționarea la un anumit unghi θ dorit a spotului laser.

2) Scannerul rezonant (Fig.1.33):

Caracteristici:

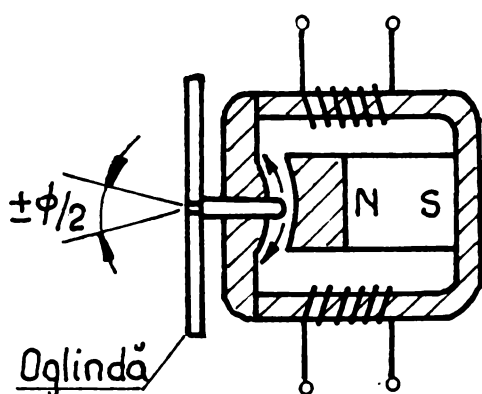


Fig.1.33 Scannerul rezonant

- absența aproape completă a amortizării face ca dispozitivul să poată realiza vibrații de amplitudine ridicată doar în vecinătatea frecvenței de rezonanță. În consecință, acest scanner funcționează la o frecvență fixată și mai ridicată decît a scannerului galvanometric;
- caracteristica de funcționare este aproape perfect sinusoidală (linia întreruptă din fig.1.34), fără a

exista posibilitatea modelării formei ei prin impunerea unei anumite funcții de comandă, așa cum se poate proceda în varianta galvanometrică;

- consecință a aspectului anterior: dispozitivul nu poate asigura posibilitatea poziționării echipajului mobil într-o poziție oarecare dorită.

Din această cauză, deși inerția mecanică a echipajului mobil este extrem de redusă, acest tip de scanare nu poate fi desemnat (așa cum se întîmplă cu cele galvanometrice, electro-optice, acusto-optice și alte tipuri care au frecvența de funcționare reglabilă și care sunt desemnate) ca avînd "inerție scăzută" – din punctul de vedere al poziționării echipajului mobil.

Aspecte constructive: Sistemul de suspensie al echipajului mobil

Este principala problemă în determinarea uniformității procesului de scanare.

Față de varianta rotativă, variantele oscilante au avantajul compensării erorilor datorate neuniformităților de mișcare pe un număr suficient de mare de cicluri (perioade). Comparativ, în variantele rotative, aceste erori se cumulează ciclu după ciclu.

Caracteristicile sistemului de suspensie:

- arborele galvanometrului (în cazul așezării pe lagăre pe vîrfuri, elementele elastice fiind arcuri spirale plane [P5]) trebuie să fie suficient de lungi și cu rigiditate ridicată, iar armătura înfășurării limitată ca dimensiuni și masă pentru a obține amplitudini de oscilație ridicate (v. Cap.4).

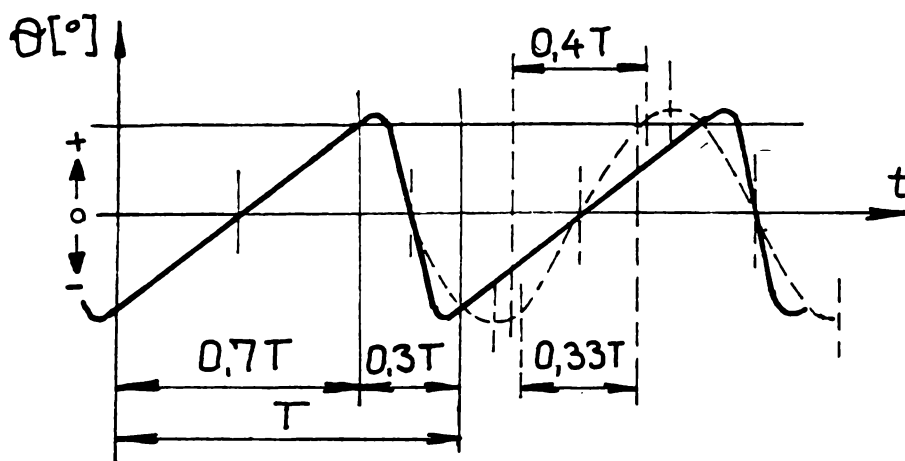


Fig. 1.34 Funcția de scanare unghiulară pentru două variante de scanare oscilante

- echipajul mobil poate fi suspendat direct pe elementele elastice, realizate de exemplu ca arcuri lamelare de torsiune. În general, datorită amortizării scăzute, aceste variante corespund scanerelor rezonante.

Prin introducerea unor amortizoare suplimentare, de exemplu cu paletă sau de tip capilar [], dispozitivul se poate utiliza ca și scaner galvanometric. Soluția obținută va avea o amplitudine a oscilațiilor ceva mai redusă, dar uniformitatea scanării crește, în condițiile unor perturbații/zgomote minime și cu o durată de viață (fiabilitate) practic nelimitată.

- probleme care mai pot să apară: modificări ale axei de oscilație cu variația unghiului echipajului mobil, posibilitatea apariției modurilor secundare de oscilație la atenuări foarte reduse, rigiditate radială redusă a montajului. Majoritatea factorilor pot fi însă bine controlați chiar în variantele de dispozitive de tip comercial.

Aspecte comparative: Realizarea gradului de acoperire η

În varianta scannerului rezonant se pune problema selectării din caracteristica de funcționare (Fig.1.34) sinusoidală o porțiune centrală, aproximativ liniară, și de a o liniariza în continuare prin prelevarea semnalului la intervale de timp spațiate corespunzător.

Neuniformitățile care apar în această prelevare sunt cu atât mai mari cu cât se dorește utilizarea unei porțiuni mai largi din caracteristică, adică cu cât se dorește realizarea unui grad de acoperire η cât mai ridicat.

De exemplu, la un $\eta = 66,7\%$ (sau $33,3\%$ atunci când se utilizează o singură pantă a caracteristicii), neuniformitățile vitezei ating un factor de 2, adică din porțiunea centrală se prelevează de două ori mai multe semnale decât din porțiunea marginală.

La $\eta = 80\%$ (sau 40% atunci când se utilizează o singură pantă a caracteristicii), factorul de viteză atinge valoarea de 3,24. Rezultă necesitatea de a asigura controlul permanent al poziției prin senzori, pe întreg domeniul de scanare.

Pe de altă parte, în contrast cu acest aspect, scannerul galvanometric cu feedback asigură o caracteristică liniară la un grad de acoperire $\eta = 70\%$.

1.4.4. Scanere acusto-optice

Utilizare: pentru scanare rapidă, cu inerție minimă.

Performanțe:

- realizează poziționări ale spotului în orice poziție din spațiul scanat, într-un timp extrem de scurt;
- realizează o scanare liniară extrem de rapidă;
- poate divide un fascicul laser în fascicule multiple în scopul multiplexării.

Dezavantaj: rezoluție relativ scăzută, în general limitată la un număr de $N=1000$ elemente/scanare.

Principiul de funcționare (Regim Bragg) [B2]:

Difracția pe o structură - rețea de pas Λ este caracterizată de relația:

$$\sin \theta_i + \sin \theta_e = n\lambda / \Lambda \quad (1.27)$$

unde θ_i , θ_e sunt respectiv unghiurile de incidență, respectiv de emergență ale fascicolului, n este ordinul de difracție, iar λ lungimea de undă.

Regimul Bragg necesită îndeplinirea condiției:

$$\theta_i = \theta_e = \theta_B \quad (1.28)$$

Într-un strat "gros" de difracție, caracterizat de o lungime $L \geq \Lambda^2/\lambda$, unghiul Bragg are expresia:

$$\theta_B = \frac{1}{2} \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (1.29)$$

În fig.1.35, rețeaua de difracție de pas Λ este realizată prin spațierea fronturilor de undă ale unei unde acustice care traversează un mediu elastic. Un traductor acustic situat la una din extremități convertește un semnal electric generator de frecvență f_s într-o undă de presiune (acustică) care traversează mediul cu viteza v_s , fiind absorbită la capătul opus pentru a nu genera unde staționare. Unda acustică, de lungime de undă reglabilă: $\Lambda = v_s/f_s$ dă posibilitatea reglării indicelui de refracție al mediului.

Lumina incidentă este introdusă în sistem sub unghiul θ_B (reprezentat exagerat în desen).

Se pot distinge următoarele situații:

- a) $f_s=0$: în absența semnalului electric generator, fasciculul luminos trece nedeviat;

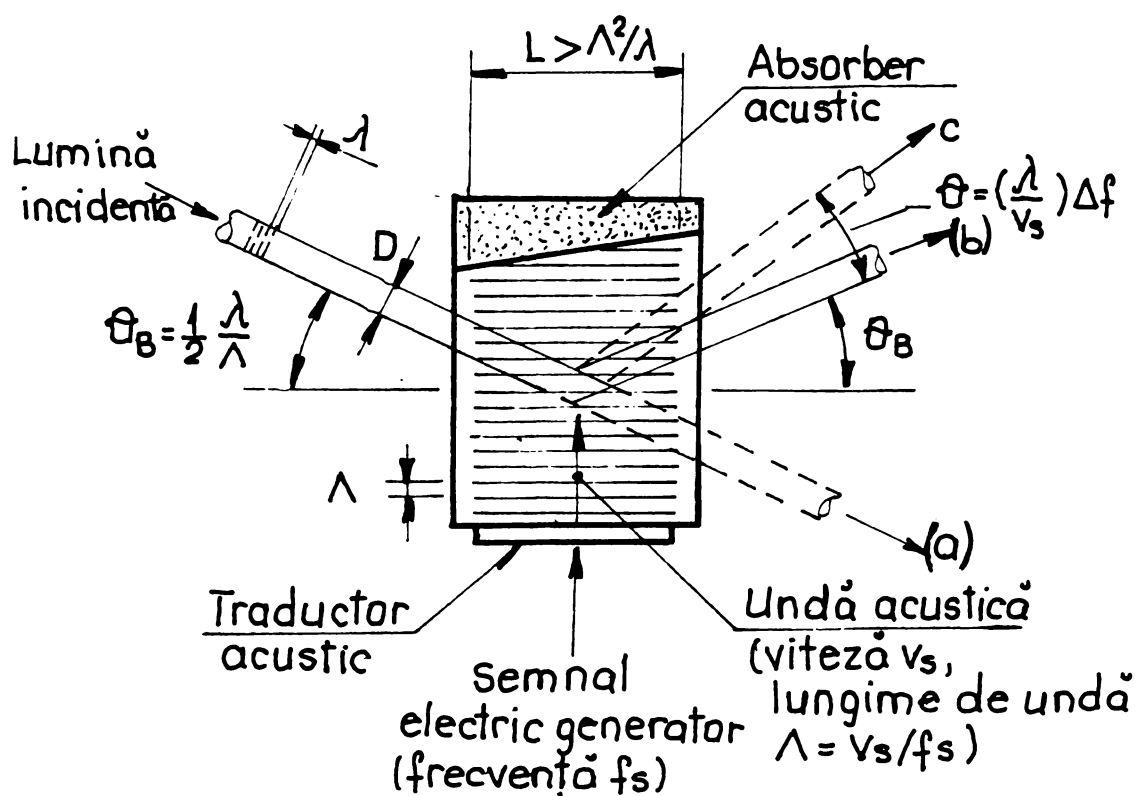


Fig.1.35 Scanner acusto-optic în regim Bragg

- b) $f_s = f_0$: la generarea unei rețele “ Λ ” prin unda acustică, unghiul de emergență $\theta_e = \theta_B$.

Se reglează amplitudinea semnalului electric pentru a obține intensitate maximă a fascicolului emergent pe direcția “b”, minimizând intensitatea ordinului zero din poziția “a”.

- c) $f_s = f_0 + \Delta f \Rightarrow$ pasul rețelei scade, iar unghiul de difracție devine $\theta_e = \theta_B + \theta$, θ fiind proporțional cu variația Δf a frecvenței semnalului electric:

$$\theta = \lambda / \Delta \Lambda = \frac{\lambda}{v_0} \Delta f \quad (1.30)$$

Diametrul fascicolului este:

$$D = v_s \tau \quad (1.31)$$

unde τ este timpul de parcurgere a fascicolului de către unda acustică.

Din relația (1.7) și ținând seama de (1.30), rezultă **rezoluția scannerelor acusto-optice**:

$$N = \frac{\tau \cdot \Delta f}{a} (1 - \tau / T) \quad (1.32)$$

unde a este coeficientul de formă al aperturii (§1.3), iar T este timpul total de scanare.

1.4.5. Scanere electro-optice (Scanere “gradient”)

Principiul de funcționare: Viteza de înaintare a frontului de undă (v. principiul Huygens-Fresnel) după direcția y , perpendiculară la direcția de înaintare a fascicolului

(x) este micșorată progresiv, așadar se produce o scădere corespunzătoare în lungimea de undă după direcția y (Fig. 1.36).

Pentru a se menține continuitatea fronturilor de undă, razele, traiectorii ortogonale acestora, se "îndreaptă" spre partea cu lungimea de undă mai scurtă.

Unghiul de înclinare θ (Fig. 1.36) are expresia:

$$\theta = k_0 \frac{dn}{dy} l \quad (1.33)$$

unde k_0 este constanta sistemului, iar dn/dy este gradientul indicelui de refracție pe unitatea de lungime axială (l); y este distanța transversală.

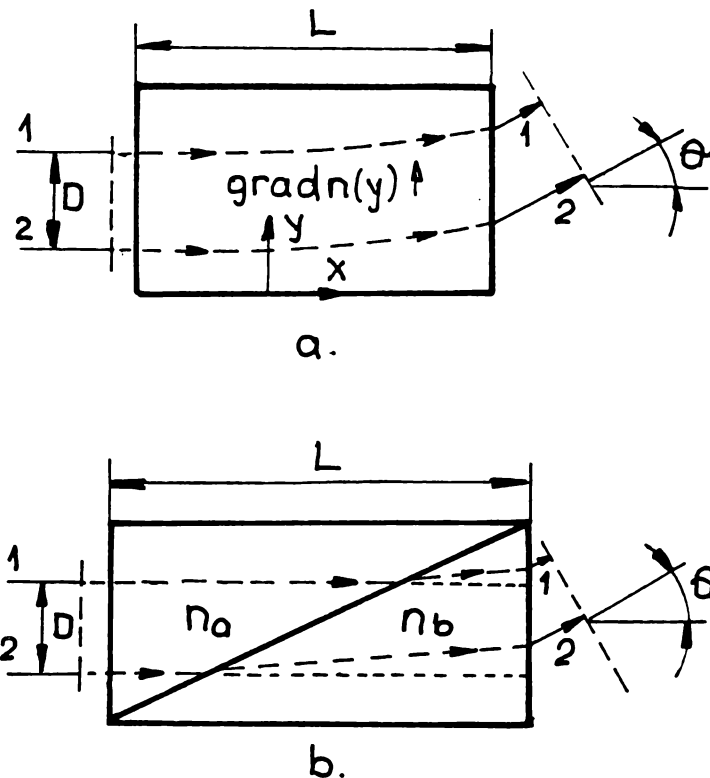


Fig. 1.36 Scanere electro-optice (scanere gradient): a) monobloc; b) cu biprismă

Considerînd diametrul D al fascicolului, L lungimea stratului de material după x și Δn variația totală a lui n de-a lungul axei y corespunzătoare întregului diametru D , **unghiul de scanare** rezultă:

$$\theta = \frac{\Delta n L}{n_f D} \quad (1.34)$$

unde n_f este indicele de refracție maxim atins (s-a presupus, în legea lui Snell, $\theta=0$).

Cu relația (1.34), **rezoluția** (1.5) devine:

$$N = \frac{\Delta n}{n_f} \cdot \frac{L}{a\lambda} \quad (1.35)$$

Realizarea dispozitivului:

Un scanner gradient poate fi simulat utilizînd un ansamblu de prisme electro-optice alternante.

Un ansamblu cu o biprismă este prezentat în fig. 1.36b, iar o rețea iterativă în fig. 1.37.

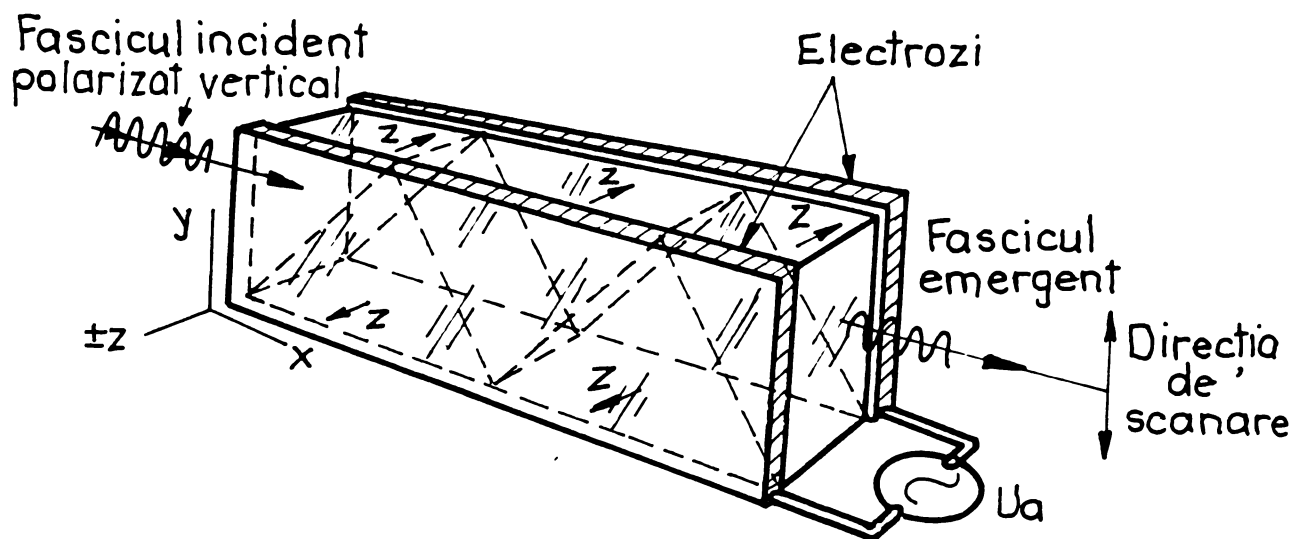


Fig.1.37. Scaner electro-optic iterativ (de tip rețea)

Fiecare interfață introduce propria deflecție, acestea cumulându-se. Direcția și viteza întârzierii după axa y este controlată de modificările indicelui de refracție al materialului electro-optic.

Performanțe: Datorită coeficienților electro-optici ($\Delta n/n_f$) extrem de mici, sunt necesare tensiuni de alimentare U_a extrem de mari pentru a atinge chiar rezoluții moderate: $N \cong 100$, ceea ce constituie un dezavantaj al acestei soluții.

Avantajul acestei soluții îl constituie viteza de scanare ridicată (până la 10^5s^{-1}) și absența oricărei inerții (la fel ca și la dispozitivele acusto-optice). În consecință aceste dispozitive sunt utilizate în montajele cu feed-back pentru control pozițional.

Capitolul 2

APLICAȚII ALE TEHNICILOR DE SCANARE

2.1. Scanarea în domeniul comercial

2.1.1. Scanarea codurilor de bare

Această aplicație constituie una din cele mai importante din punct de vedere al răspîndirii și a profitabilității.

Utilizarea codurilor de bare privește:

- marcarea bunurilor de larg consum;
- stocarea și urmărirea unor articole specifice: circuite integrate, plicuri sau pachete poștale, diferite documente (de exemplu clasificarea brevetelor de invenție, a cărților în biblioteci, a diferitelor articole stocate în depozite automatizate, etc.);
- cartelele de identitate, cărțile de credit ș.a.

Clasificarea scannerelor pentru coduri de bare:

- dispozitive fixe (de exemplu cele de la casele de marcat din magazine);
- scanere de mână;
- scanere la care citirea etichetei "barcode" se face prin deplasarea acesteia, pe o bandă transportoare, prin dreptul fascicolului laser.

Observație: Pentru aplicații nepretențioase, de proximitate (de exemplu scanerile de mână utilizate în supermarket-uri), se pot aplica soluții bazate pe utilizarea CCD-urilor.

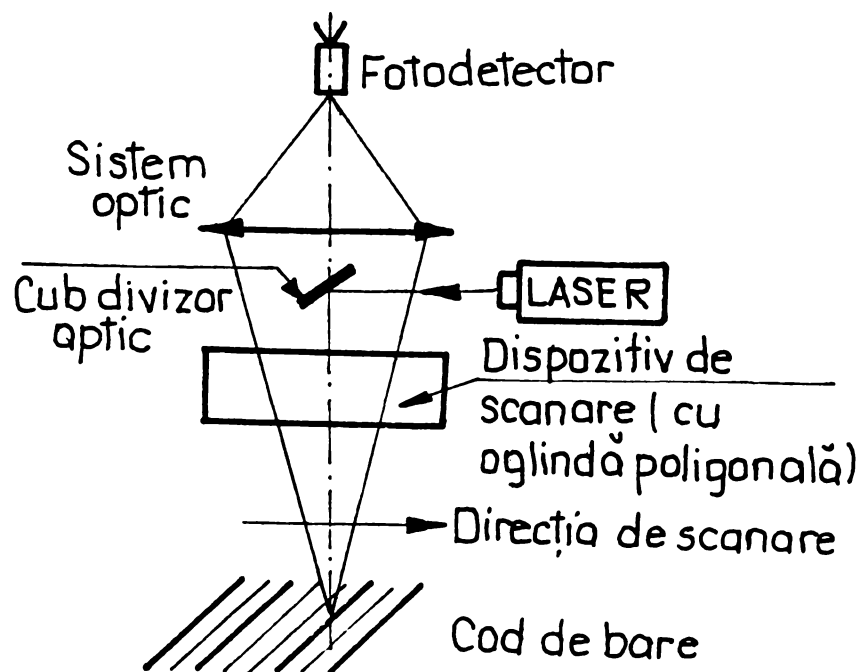


Fig.2.1 Principiul scanării codurilor de bare

Principiul de funcționare a soluției statice de dispozitiv de scanare pentru coduri de bare este prezentat în figura 2.1 [T3]: o rază laser colimată este deflectată cu mare viteză, pentru a produce linii repetitive de scanare. Când în fața razei se poziționează un cod de bare, intensitatea fascicolului reflectat difuz este modulată de alternanța de zone puternic, respectiv slab

absorbante a codului. Lumina reflectată este colectată de un sistem optic și focalizată pe un fotodetector care convertește semnalul optic într-unul electric analogic care este apoi digitizat și convertit într-un cod numeric de un microprocesor sau de un computer de sistem.

Observație: Pentru ca sistemul să poată lucra în ambiente puternic iluminate, în fața fotodetectorului se poziționează un filtru de bandă care permite să treacă doar lumina cu lungimea de undă specifică laserului utilizat.

Soluție particulară: utilizarea luminii laser polarizate (Fig.2.2). Aceasta este de preferat în toate cazurile în care lumina reflectată este foarte puternică, "mascând" practic modularea fascicolului produsă de scanarea barelor codului: cazul codurilor de bare practicate pe suprafețe metalice sau pe hârtie lucioasă (coeficient de reflexie ridicat).

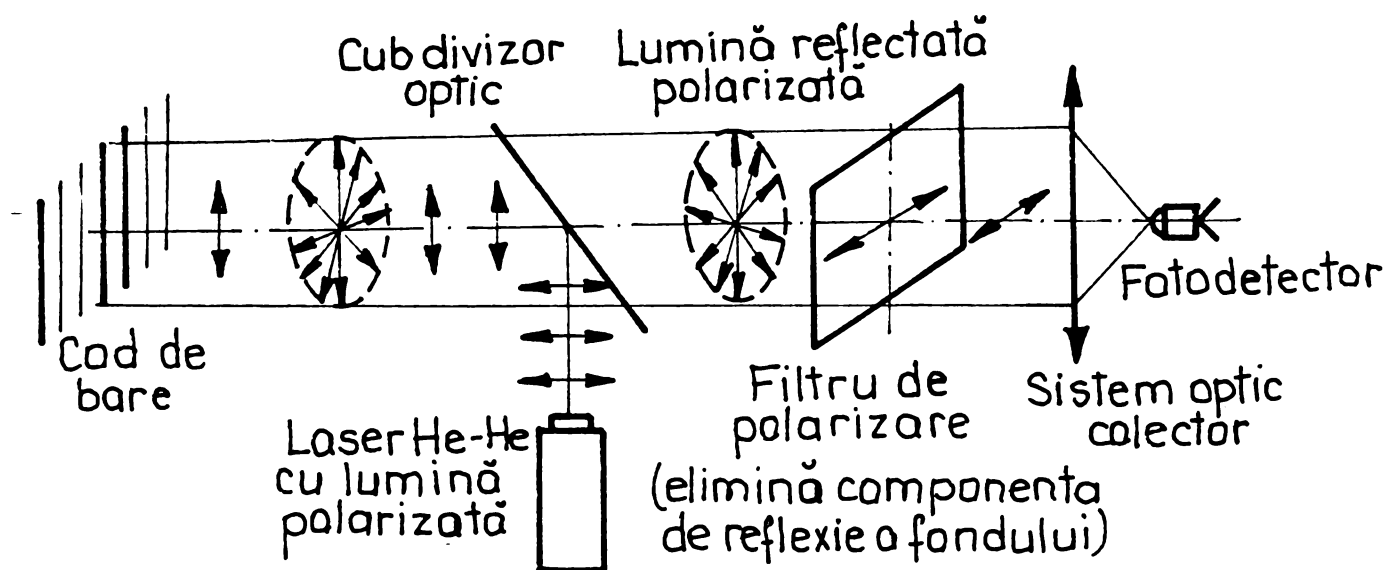


Fig.2.2. Scanarea codurilor de bare cu lumină polarizată

Tendențele viitoare de dezvoltare a domeniului scannerelor codurilor de bare:

- dezvoltarea unor soluții cu costuri cât mai mici (factorul economic este preponderent ca importanță), cu lasere de putere mică (maxim 35 mW pentru anumite lasere cu He-Ne), în condițiile unei fiabilități ridicate, durata de funcționare estimată fiind de ordinul zecilor de mii de ore;

- realizarea unor soluții cu acuratețe cât mai ridicată, dar în condițiile unor costuri cât mai reduse;

- crearea unor sisteme "inteligente" în care, pe baza citirii codurilor de bare, să se realizeze de exemplu sortarea automatizată a unor produse (exemplu: firma Computer Identics, care a realizat dispozitive de scanare foarte rapide - pînă la 1200 scanări/s).

- realizarea unor sisteme de scanare multiple (compuse din pînă la 14 capete de scanare - firma Accu-Sort) capabile să citească codul de bare aplicat oriunde pe produsul care trece printr-un "tunel de scanare". Datorită "căderii" puternice (cu pînă la 50%) a prețurilor scannerelor individuale, o asemenea aplicație devine rentabilă cu condiția minimizării ratei de necitire ("scăpări") la cca. 1÷2%.

- dezvoltarea soluțiilor de capete de citire prin scanare bidimensională, în care codul de bare devine o matrice care poate conține 100 caractere/inch, spre deosebire de

soluțiile uni-dimensionale, de cca. 10 ori mai puțin performante din acest punct de vedere (v. §5.1).

2.1.2 Tehnici tipografice (Imprimanta laser)

Echipamentul consacrat în domeniul reproducerii tipografice prin scanare îl constituie imprimanta laser, produsă de o serie de firme, dintre care cea mai cunoscută este Rank Xerox. Echipamentele produse de aceasta ating rezoluții deosebit de bune (22 linii/mm) și viteze de tipărire mari (30÷50 mm/s sau, altfel exprimat, 6÷10 pagini A4/min), în condițiile unei flexibilități deosebite față de sistemele clasice prin culegere sau litografiere.

O dezvoltare a variantei clasice caracterizată de performanțele amintite se urmărește printr-o colaborare în curs între firmele Xerox, Honeywell și Sandia. Se

urmărește realizarea unei imprimante laser care să utilizeze o cavitate laser de tip rețea, imprimând astfel simultan o matrice de puncte; utilizând acest sistem, se poate prevedea o creștere atât a rezoluției, cât și a vitezei de imprimare.

Schema de principiu a acestei imprimante, analoagă însă unei imprimante clasice, este prezentată în figura 2.3. S-au notat:

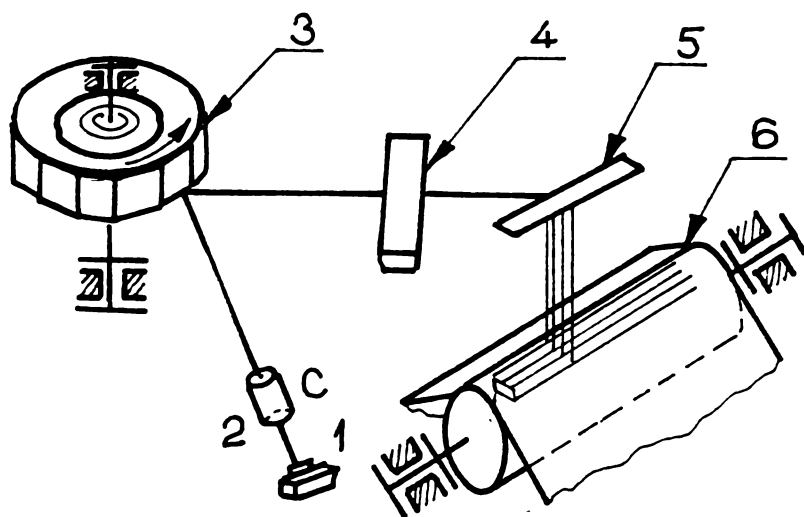


Fig.2.3 Schema de principiu a imprimantei laser

verticală; 2 - colector; 3 - cap de scanare cu oglindă poligonală rotitoare; 4 - sistem optic cu lentilă cilindrică; 5 - oglindă; 6 - cilindru imprimantă.

2.1.3 Citirea memoriilor optice de mare capacitate

Memoriile optice permit stocarea unei anumite cantități de informație pe suprafețe de 100 de ori mai mici decât memoriile magnetice, rezolvându-se de asemenea problema consumului de energie, a greutateii și complexității mecanice a sistemului [T2].

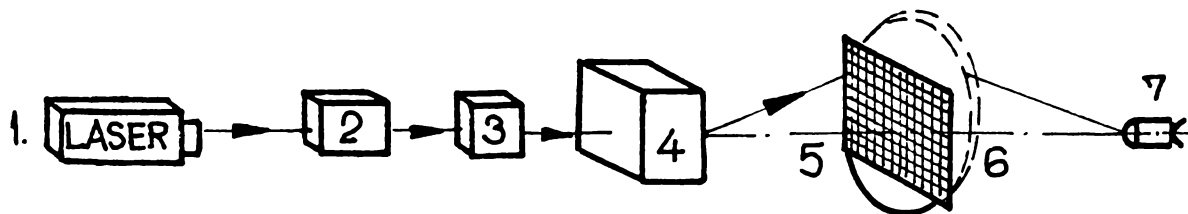


Fig.2.4 Citirea memoriilor optice: schema de principiu

Memoriile optice se pot realiza prin diferite metode: holografice, ca fotoemulsii cu rezoluție ridicată, prin fotocromism sau utilizând laserul pentru a evapora materialul

sau pentru a-l încălzi peste o temperatură critică, particulele suportului putând fi astfel influențate de câmpurile electrice sau magnetice.

Indiferent de metoda utilizată, schema de citire a memoriei optice este cea indicată în figura 2.4 (Schema fiind identică sau nu cu cea utilizată la înscripționare).

Fascicolul laser (1) trece prin modulatorul (2), prin sistemul optic de focalizare (3), apoi este dirijat prin sistemul de scanare 2D (4) (v. Cap. 5.1) pe planul informației memorate (5).

Trecând prin acest plan, caracteristicile razei (intensitatea, faza sau polarizarea) sunt modificate și după detecție, prin concentrarea de către sistemul optic (6) pe fotodetectorul (7), rezultă un semnal al cărui variații constituie cifre binare, 0 sau 1.

Memoria poate fi permanentă sau să permită ștergerea și înscrierea repetată.

2.1.4. Sistem de televiziune laser

În figura 2.5 este reprezentată o variantă de sistem de televiziune cu dispozitive de scanare laser [O₁]. Fascicolul inițial este focalizat de lentila L₁ pe un modulator acusto-optic (M), asigurându-se astfel un contrast superior al imaginii. Lentila cilindrică LC₁ refăce colimarea fascicolului în planul vertical (meridian), în timp ce în plan orizontal (sagital) fascicolul continuă să se expandeze, devenind paralel abia după trecerea prin LC₂.

Scannerul 1 (Sc.1) acusto-optic, produce deflexia orizontală a fascicolului care va fi ulterior focalizat în plan vertical de LC₄ (apoi de L₂) pe scannerul 2 (Sc.2), galvanometric, care produce deflexia fascicolului în plan vertical.

Componentele de "stop" (S) au rolul de a lăsa să treacă doar maximele de difracție de ordinul 1, eliminându-le pe toate celelalte.

Imaginea de dimensiuni mici, intermediară (1) formată după Sc.2 și L₃ este mărită printr-un sistem de proiecție (L₄+L₅) pentru a produce (2), apoi imaginea finală (3).

Sistemul, prezentat în principiu, poate fi compactat suplimentar și, prin adăugarea unor noi componente, funcțiile sale pot fi rafinate și îmbunătățite.

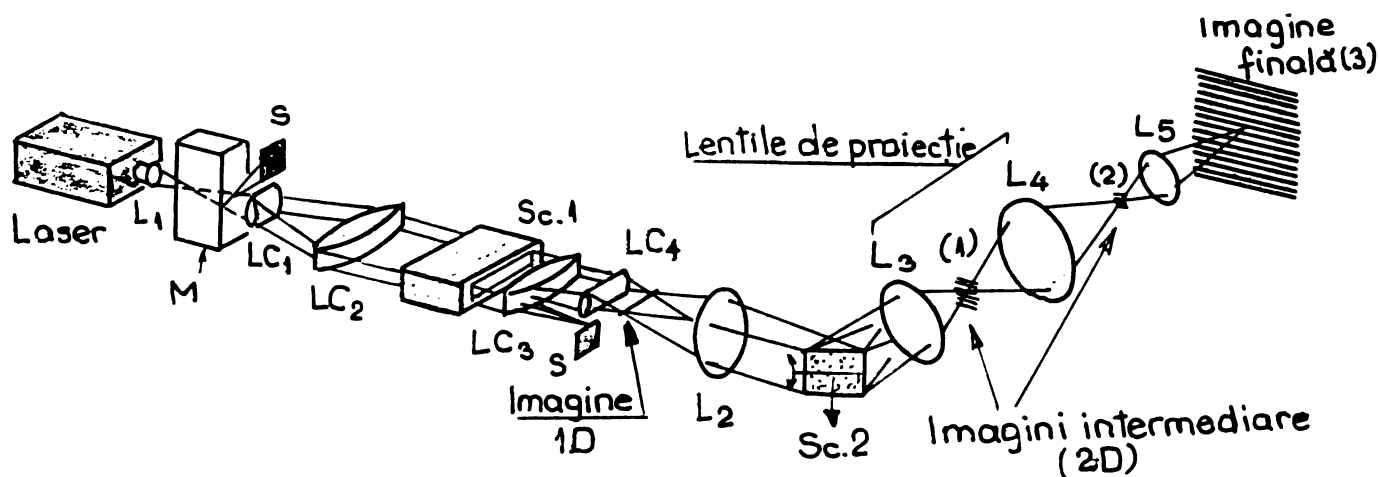


Fig.2.5 Sistem de televiziune laser

2.2 Scanarea în domeniul tehnicilor de laborator

2.2.1 Microscopia prin scanare

Acum 15 ani microscopia scanării cu tunel furniza primele imagini ale unor eșantioane la rezoluții atomice.

În prezent, tehnologia cunoscută drept microscopie cu scanare a probei produce imagini de înaltă rezoluție și în plus cartografiază proprietăți de material ce conțin informații suplimentare despre probele analizate. Probele pot fi: cipuri semiconductoare, reacții chimice, discuri de computer, medicamente sau filme fotografice etc. [2, 6].

În continuare se vor trece în revistă principalele **tipuri de microscopie prin scanare**:

a. Microscopia cu sondă de scanare (SPM) este un termen global pentru o multitudine de modalități de microscopie bazate pe un principiu unic.

Modalitatea de lucru a microscopiei prin scanare este diferită de a microscopiei optice sau electronice. Astfel, microscopicele optice pot măsura cu o rezoluție de circa 250 nm; microscopicele electronice ating valori ale rezoluției de 1 nm, dar numai în vid și pentru probe minuțios prelucrate. Microscopia cu scanare însă nu folosește lentile, necesită pregătiri minime asupra probei analizate și produce imagini prin “atingere”/”contact”.

Esența tehnicii SPM o constituie utilizarea brațului “**cantilever**”. Montată la extremitatea acestuia, se găsește o sondă triunghiulară al cărei vîrf are o lățime de doar câteva zecimi de micrometri.

O rază laser se reflectă de pe extremitatea **cantileverului** pe un fotodetector de poziție. Un scaner piezoelectric deplasează sonda de-a lungul suprafeței a cărei imagine se dorește a fi obținută, la distanțe de câteva zeci de nanometri. Când topografia suprafeței se schimbă, se produce o mișcare a capătului sondei în sus sau în jos, fotodetectorul sesizează mișcarea, iar computerul transformă deflecția în informație de tip tridimensional (3D).

Grosimentul (la microscopice vizuale) sau mărirea (la cele cu proiecție pe ecran sau cu cameră foto) sunt controlate prin mărirea și forma spotului luminos ce “palpează” măsurandul. Cu cât acesta este mai ascuțit, cu atât mărirea atinsă este mai mare. Astfel, un microscop cu scanare prin sondă depășește în rezoluție un microscop optic, grosimentele obișnuite fiind de ordinul 10^6 . De asemenea, câtă vreme cu un microscop optic se pot produce doar imagini, prin tehnica SPM se pot examina câmpuri magnetice, suprafețe de fricțiune, adeziune, conductivitate termică și altele.

b. Microscopia în domeniul termic poate măsura proprietățile termice ale structurilor microscopice, importante în aplicații de control a calității materialelor, precum analiza caracteristicilor de material și analiza componentelor electronice. Prin măsurarea diferențelor de proprietăți termice cum sunt cele ale punctelor fierbinți ale circuitelor integrate, se pot diagnostica cu precizie defectele de material și rezistențele reziduale. Pentru a produce o “**imagine termică**”, sondele ce sesizează temperatura sunt montate la vîrfurile unui braț “**cantilever**” și scanează suprafața, cartografiind simultan atât topografia probei analizate, cât și distribuția termică. Aceste sonde pot detecta diferențe de temperatură de 0,1 °C, cu o rezoluție de 0,2 μm - dimensiune suficient de mică pentru a identifica structura specifică a unui cip de siliciu.

c. În varianta cea mai comună a microscopiei cu sondă de scanare, **microscopia cu forță de contact atomică, (AFM)**, sonda atinge suprafața investigată. În timp ce brațul urmărește suprafața, forțele de contact obligă vârful să se îndoiască.

Ca și în cazul altor modalități, AFM pleacă de la cercetarea fundamentală pentru a ajunge o unealtă de rutină, de exemplu în medicina ortopedică. Astfel, înlocuirea totală a articulațiilor de șold a devenit o procedură standard, dar durata de viață a articulațiilor artificiale depinde de netezimea suprafețelor articulațiilor. Materialele ceramice acoperite cu polietilenă cu masa moleculară foarte redusă sunt cele care echipează capul femural care se îmbină cu un locaș realizat din polietilenă. Ambele părți ale articulației sunt supuse frecării în timpul mișcării, rezultând aşchii de material ce cauzează o uzură progresivă. Cu cât suprafața este mai rugoasă, cu atât probabilitatea ca proteza să reziste în timp este mai mică - fiabilitatea produsului scade. Cu metode de tip AFM se pot analiza precis aceste suprafețe la o scară nanometrică, astfel ca determinarea rugozității să permită diagnosticarea duratei de viață.

Există limite specifice sistemelor SPM care trebuie luate în considerare și rezolvate. Cea mai uzuală problemă care apare este faptul că în condiții de mediu obișnuit, suprafața eșantionului este acoperită de un strat subțire de **umezeală** și azot. Când sonda atinge acest strat parazit, se formează un menisc și vârful sondei este atras de tensiunea superficială către suprafața eșantionului. Această atracție produce o forță de frecare distructivă și mișcarea sondei în timpul scanării poate deteriora suprafețele moi, rezultând o distorsiune a datelor obținute.

Pentru a preveni aceste inconveniente s-au dezvoltat două **soluții**:

- AFM fără contact;
- AFM cu contact intermitent.

În aceste cazuri, sonda oscilează deasupra suprafeței eșantionului, respectiv suficient de aproape de suprafață în așa fel încât să aibă loc doar o atingere ușoară (controlată). Datorită intermitenței contactului, forțele de frecare se reduc considerabil. Aceste modalități sunt pași cheie în explorarea sistemelor fragile, unde se manifestă forța de adeziune sau în cazul unor substanțe cu interacțiuni reduse cu statul de bază (depuneri de material). Molecule de dimensiuni mici precum oligonucleotidele sunt instabile în cazul folosirii unei metode de scanare prin contact; forțele laterale extrem de mici obținute în varianta contactului intermitent permit însă scanări încununate de succes.

d. O altă modalitate specifică SPM este **microscopia cu forță magnetică (MFM)**, ea punând în evidență variațiile spațiale ale forțelor magnetice de la suprafața eșantionului.

În MFM, vârful sondei este acoperit cu un film subțire feromagnetic și se deplasează deasupra eșantionului.

Gradientul forței magnetice exercită o forță specifică asupra momentului magnetic al sondei, monitorizarea răspunsului sondei alcătuind o hartă a câmpului magnetic.

O imagine obținută cu un astfel de sistem MFM conține informații despre topografie și proprietățile magnetice ale suprafeței, efectul dominant depinzând de distanța dintre sondă și suprafața scanată; prin scanarea la diverse înălțimi se obțin diverse tipuri de imagini ale eșantionului.

MFM își găsește aplicabilitatea maximă în sisteme de stocare a datelor, putând detecta porțiuni mai mici de 50 nm și respectiv câmpuri magnetice sub suprafața de protecție nemagnetică ce se aplică în scopul protecției hard-discurilor și dispozitivelor optice.

e. Microscopalele hibrid - cunoscute sub forme de **microscopale optice cu câmp apropiat de scanare (NSOMS)** - combină avantajele microscopiei optice cu cele ale SPM și sunt utilizate de exemplu în măsurarea pieselor de dimensiuni miniaturale, cum sunt circuitele integrate sau firele trefilate de dimensiuni foarte mici.

Față de procedeele clasice de măsurare optică prin vizare (cu microscopale de măsurare instalate în pinola mașinii de prelucrat), metoda prezintă avantajul posibilității măsurării în regim automat, pe fluxul de fabricație. Măsurătorile sunt integrate unui sistem inteligent, controlat de un calculator, eventual în regim on-line, calculatorul introducând pe baza rezultatelor măsurătorii, în timp real, corecțiile necesare pentru reglarea mașinii de pe fluxul de fabricație.

Microscopalele optice convenționale sunt limitate ca performanță prin mărimea spotului luminos, de 200 μm teoretic dar practic, de 500 μm . S-au realizat însă microscopale (tipul Aurora, introdus de firma Topo Matrix Corporation), care doboară aceste limite prin scanarea probei cu o fibră optică având diametrul de 30 μm ; prin integrarea imaginilor obținute într-o imagine de ansamblu, rezultă o limită de rezoluție a aparatului mai mică de 50 nm, prin faptul că lumina emisă prin fibra optică rămâne colimată aproximativ 15 nm. Așadar menținând proba în vecinătatea fibrei, limita de rezoluție teoretică nu mai este dată de fenomenul de difracție, ci de mărimea aperturii.

Ca procedeu tehnologic ce condiționează obținerea dezideratului propus, fibrele optice utilizate au la capăt o porțiune pe care se face o depunere de Al în vid pe tot diametrul, lăsându-se "descoperită" doar în vârful fibrei, o porțiune cu $\Phi 30$ nm.

Un sistem optic cu diametrul mare (obișnuit) preia informația optică de la fibră, traducând-o în variație de intensitate luminoasă printr-un sistem de fotodetectori. Printr-un sistem de control cu feed-back, se menține capul fibrei la distanță constantă (10÷15 nm) de suprafața probei, obținându-se astfel inclusiv date topografice, pe lângă cele optice.

Pe lângă aplicațiile amintite, acest tip de microscop mai este utilizat în microscopia biologică cu fluorescență, controlul semiconductorilor, investigații spectroscopice, detecția moleculelor izolate.

f. investigarea probelor biologice:

Aparatul consacrat poartă numele de **Bioscope Scanning Probe Microscope** și utilizează un sistem dual: conține un microscop optic cu ajutorul căruia se selectează zona de maxim interes din probă și un microscop amicroscopic (bazat pe forțele de interacțiune atomice), cu ajutorul căruia se depășește bariera de difracție a luminii care limitează rezoluția microscopalelor optice. Aparatul dispune de toate tehnicile convenționale de microscopie, precum și ale tehnologiilor de scanare a probei de înaltă rezoluție.

Ca domenii de aplicație, trebuie amintite: realizarea de observații biologice la nivelul moleculelor, la suprafața și în structura celulelor, a virusilor, precum și în structura ADN -ului. Se preconizează că, în perspectivă, acest tip de procedeu va juca un rol esențial în realizarea hărții genetice umane.

Exemplu: Microscop prin scanare (Fluoview, Olympus) [2]

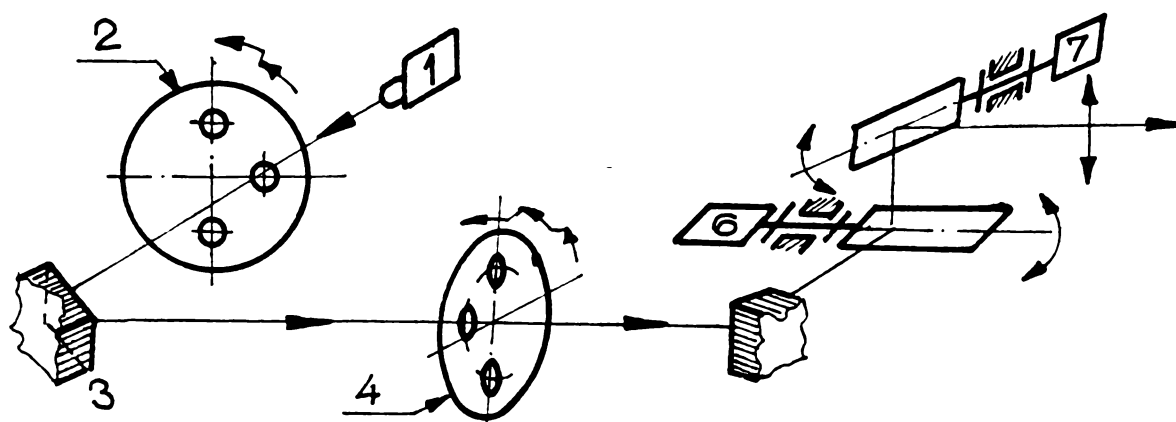


Fig.2.6 Schema optică (simplificată) a capului de scanare modular a unui microscop prin scanare

S-au notat: 1 - Sursă laser; 2 - Disc cu filtre neutre; 3,5 - Oglinzi; 4 - Diafragme "vârf-de-ac"; 6,7 - Scanere de tip galvanometric; 8 - Obiectiv.

Principiul de funcționare: Raza laser, produsă de 1, modulată ca intensitate și diametru prin respectiv filtrele 2 și diafragmele 4, este deflecată de cele două scanere, 6 și 7, poziționate cu axele oglinzilor perpendicular, în pupila de intrare a obiectivului 8, astfel încât, după ieșirea din 8 să fie scanată, punct cu punct (obiectivul asigură focalizarea) suprafața probei care se dorește a fi investigată.

Suprafața probei găsindu-se în planul xOy , scanarea după axa Oz este posibilă prin focalizarea obiectivului 8 cu un micromotor de acționare. Variantele moderne ale unui asemenea microscop [1] obțin astfel după axa Ox rezoluții de $0,1 \mu\text{m}$ pe o profunzime maximă (domeniu) de 1mm .

Modurile de scanare care se pot obține sunt în consecință multiple: se pot obține imagini 2D (xy, xz), 3D (xyz) sau chiar 4D ($xyzt$), adică evoluția reliefului probei în timp. De asemenea, se pot face scanări rapide, de tip linie, 1D (xt sau yt).

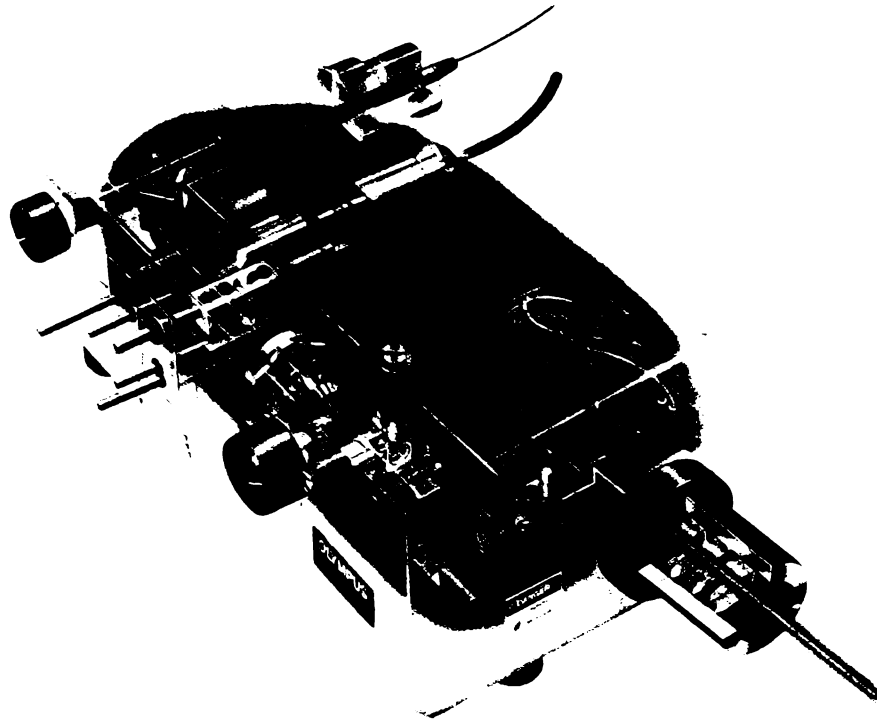
Caracteristici (exemplu: Microscopul Fluoview, Olympus [1] - Fig.2.6):

- sursa laser cu argon $P = 5\text{mW}$ (tendința de trecere de la sursele clasice, UV, toxice, la cele în IR);

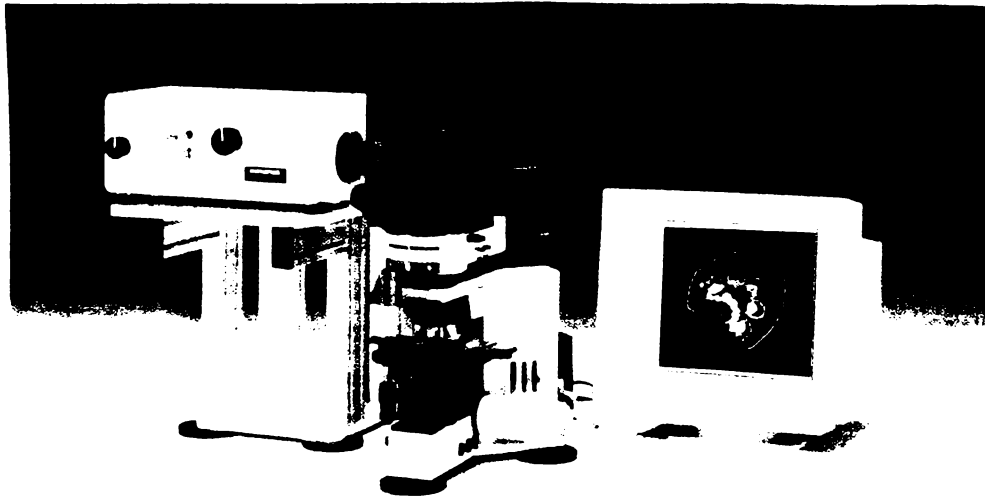
- mărimea imaginii, pînă la 1024×1024 pixeli;

- viteze mari de scanare posibile. Rezultă:

- pentru imagini de 256×256 pixeli, timpul de scanare total = $(0,6 \div 23,1)\text{s}$;
- pentru imagini de 1024×1024 pixeli, timpul de scanare total = $(3,3 \div 158)\text{s}$.
 - rezoluție înaltă de scanare;
 - șapte moduri de scanare posibile;
 - achiziții de semnal posibile simultan pe două canale;
 - accesorii diverse:
 - pentru observare vizuală;
 - cameră video;
 - monitorizare pe PC (cu software adecvat).



a.



b.

Fig.2.7. Microscopul Fluoview (montajul BX50), firma Olympus: a) capul de scanare
b) ansamblu microscop

2.2.2. Tehnicile P.I.V

Această tehnică, Particle Instantaneous Velocity (P.I.V.) Measurement, este utilizată pentru analiza comportării fluidelor, procesarea datelor obținute realizându-se în timp real.

Principiul metodei constă în determinarea vectorilor viteză instantanee a particulelor aflate în suspensie într-un fluid prin înregistrarea și măsurarea deplasării acestora folosind tehnici de corelare.

Etapele procedurii sunt:

- însămânțarea câmpului de fluid cu particule de măsurare;
- iluminarea fluidului (o secțiune bidimensională a acestuia) cu o rază laser;
- obținerea unor multi - expuneri și înregistrarea lor;
- analiza înregistrării P.I.V. pentru determinarea hărții vectorilor viteză.

Pentru ceea ce face obiectul acestei lucrări, aspectul de maxim interes îl constituie sistemul de iluminare.

Principalele **metode de iluminare** dezvoltate pînă în prezent sunt (Fig.2.8):

1) **Laserul pulsatoriu:** se utilizează un laser Nd : YAG, a cărui rază este deflectată (transformată practic într-o foaie de lumină pulsatorie) utilizînd un cap de scanare cu oglindă plană rotitoare.

Un aspect interesant îl constituie “ghidul” de lumină dezvoltat special pentru acest sistem. Deoarece cu o legătură obișnuită de cabluri cu fibre optice se obține, cu tehnologia actuală, o ieșire de doar 20 mJ iluminare, s-a realizat un “ghid” - braț constituit din tuburi goale articulate, care reușește să transmită peste 500 mJ radiație laser, cu un randament de transmitere de peste 90%, pentru $\lambda = 532$ nm.

2) **Unda laser continuă cu rază expandată:**

Aspectul pulsatoriu necesar este obținut cu un modulator/chopper (Anexa 1, fig.A1.4), iar raza (avînd profilul distribuției intensității pe diametru de tip Gaussian) este apoi “împrăștiată” de o lentilă cilindrică într-o “foaie de lumină” pulsatorie.

Problema care se pune este utilizarea lentilei, ceea ce duce la o importantă variație a intensității luminii de-a lungul foii de lumină (supraexpunere în centru și subexpunere la margini), ceea ce ar constitui un dezavantaj inacceptabil.

Soluția s-a găsit prin utilizarea unor componente optice (lentile) speciale, care dau o distribuție de tip “top - hat” a intensității (constantă pe secțiune), rezultînd o iluminare egală a întregii suprafețe a zonei de fluid studiate.

3) **Unda laser continuă cu dispozitiv de scanare:**

Se utilizează un scanner cu oglindă poligonală, avînd motorul de acționare cu turație reglabilă, astfel încât frecvența impulsurilor să poată fi modificată pentru corelarea cu parametrii de măsurat.

Laserul folosit (la variantele 2 și 3) este de tip argon - ion, cuplat la capetele de lucru prin cabluri optice multi-fibră.

Alegerea metodei adecvate unei anumite aplicații se face în funcție de o serie de factori: tipul și suprafața câmpului de fluid, vitezele implicate și dimensiunile particulelor “însămânțate”. La fel, se alege densitatea de energie a razei și frecvența necesară a impulsurilor.

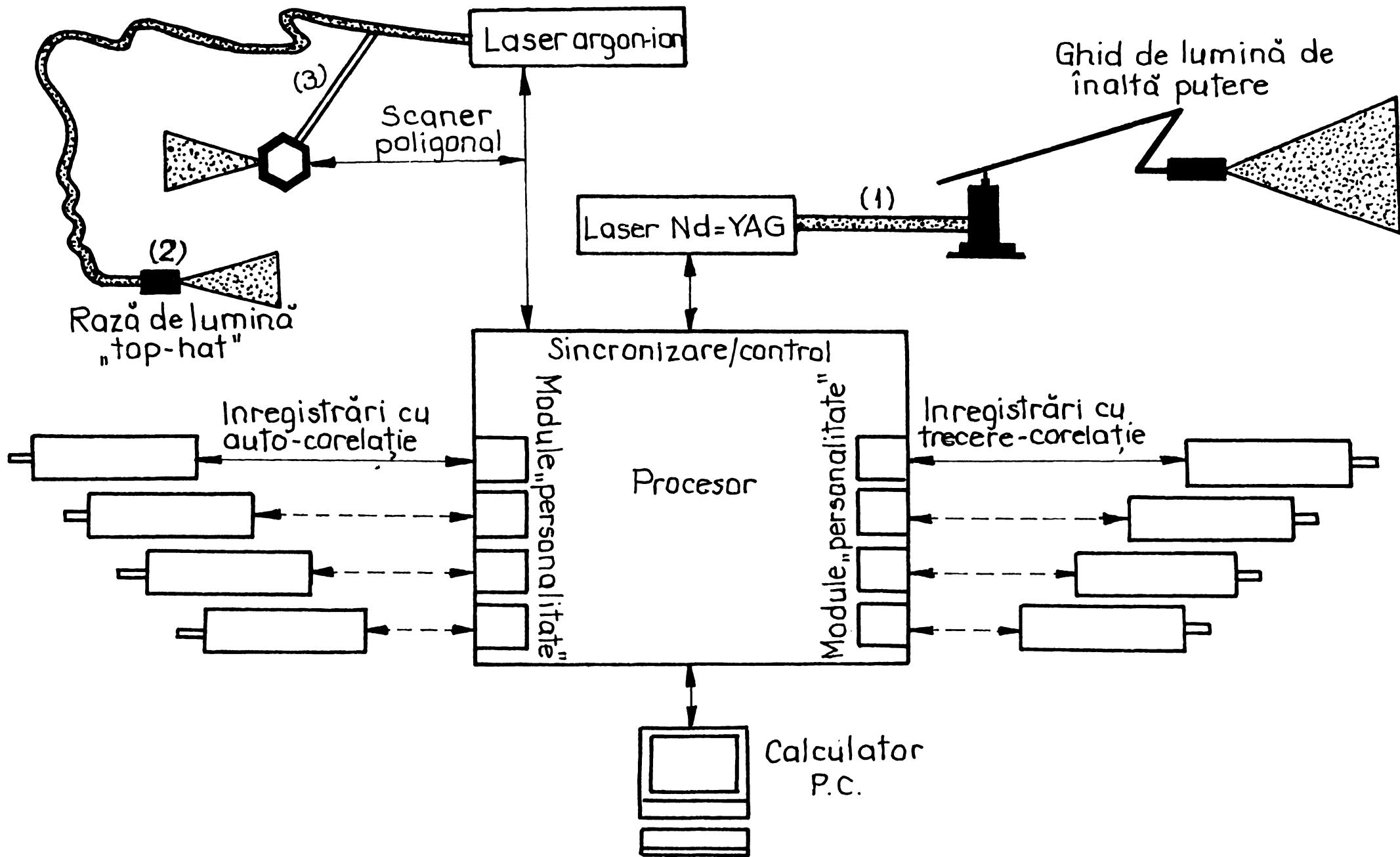


Fig.2.8 Tehnicile P.I.V.: schema de principiu

Observații privind celelalte aspecte ale procesului P.I.V.:

a) **Sistemul de înregistrare** poate fi:

- cu film fotografic: dezavantajos deoarece procesarea datelor este în acest caz greoaie și consumatoare de timp;
- cu cameră video (CCD) de înaltă rezoluție: constituie varianta preferată.

b) **Procesarea semnalului:**

Procesorul utilizat oferă o platformă hardware pentru întreg procesul de sincronizare și control.

Funcțiile sale sunt astfel multiple: de exemplu, perioada pulsațiilor laser și deschiderea și închiderea diafragmei camerei video trebuie să fie sincronizate pentru ca senzorul camerei video să fie singurul expus fascicolului laser, astfel încât lumina ambientală să nu afecteze raportul semnal util-zgomot.

c) **Software:**

Are ca funcții: achiziția datelor și controlul, analiza și înregistrarea datelor.

Există biblioteci specializate, cu specificații despre componentele utilizate: laseri, dispozitive de scanare, diafragme, camere CCD. Meniurile sunt on-line, permițând modificarea parametrilor în timpul experimentului, mai precis achiziția și analiza datelor, în scopul optimizării preciziei măsurării.

2.3 Scanarea în domeniul industrial

2.3.1 Măsurători prin scanare

2.3.1.1. **Schema de principiu** a unui aparat de măsurare a mărimilor geometrice prin scanare cu rază laser este prezentată în figura 2.9.

Elementele componente sunt: tubul laser (1), două sisteme optice de focalizare de tip colimator (2), un fotodetector (3) și, ca element esențial, capul de scanare (4), aflat în mișcare de rotație sau de oscilație.

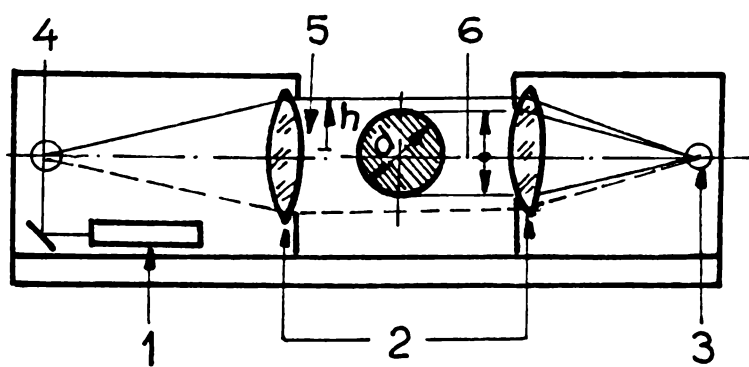


Fig.2.9 Aparat pentru măsurători dimensionale prin scanare laser ("Micrometru" optic)

Principiul de funcționare:

Capul de scanare, constituit de exemplu dintr-o oglindă plană în mișcare de rotație, transformă raza laser fixă într-o rază rotitoare. Primul sistem optic trebuie să asigure în permanență o rază emergentă paralelă cu axa optică. Raza laser va parcurge așadar spațiul măsurand (5) după o direcție perpendiculară pe axa optică.

Există două variante posibile de prelevare de informații utile.

Astfel, dimensiunea "d" a măsurandului după direcția de scanare (perpendicular pe A.O.) poate fi dată de:

a) **mărimea intervalului de timp Δt** în care raza laser este obturată de măsurand, așadar în care fotodetectorul (3) nu primește semnal.

În acest caz, se pot întâlni două situații distincte:

- pentru o funcție de scanare $h(t)$ liniară (cazul cel mai favorabil dar pentru atingerea căruia calculul de proiectare trebuie să asigure soluții adecvate):

$$d = v \cdot \Delta t \quad (2.1)$$

unde $v = ct$. constituie viteza de scanare.

- pentru o funcție de scanare $h(t)$ neliniară (cazul general), d va fi o funcție de două variabile (Cap.3):

$$d(t_0, \Delta t) = h(t_0 + \Delta t) - h(t_0) \quad (2.2)$$

unde t_0 = intervalul de timp de la începerea unei scanări a spațiului măsurand până la atingerea de către raza laser a primei muchii a măsurandului.

Problematica referitoare la simplificarea și liniarizarea caracteristicii (2.2) se va lua în discuție în Cap.3,4.

b) **energia radiantă totală** receptată de fotodiodă la o scanare, obținută prin integrarea fluxului energetic incident:

$$W = W_0 \frac{D-d}{D} \quad (2.3)$$

unde: W_0 = energia care ar ajunge la fotoreceptor în absența măsurandului.

D = diametrul util al sistemelor optice S.O. 1, 2 în plan meridian = domeniul de măsurare.

Notînd cu k sensibilitatea modulului electronic, rezultă ca mărime de ieșire intensitatea curentului dat de FD (după redresare și amplificare):

$$I = kW_0 \left(1 - \frac{d}{D}\right) \quad (2.4)$$

așadar o caracteristică de funcționare de tipul celei din figura 2.10.

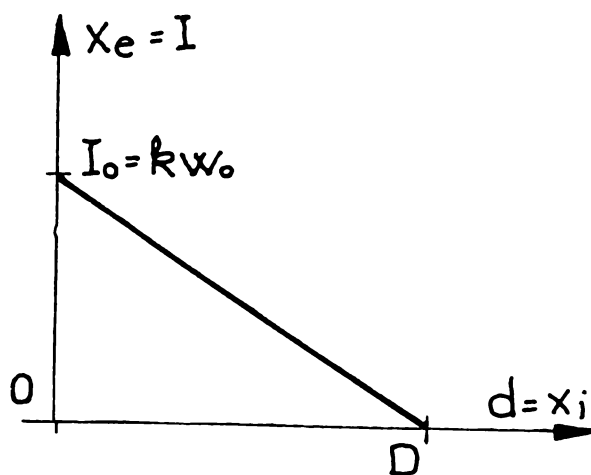


Fig.2.10 Caracteristica de funcționare a micrometrului optic cu măsurarea fluxului energetic

2.3.1.2.Sistemul de scanare. Caracteristici și utilizare

În continuare se va opta pentru varianta "a" din discuția anterioară, în figura 2.11 fiind prezentată schema bloc a unui asemenea sistem de scanare utilizat în domeniul măsurătorilor industriale[R1].

Ansamblul aparatului, cu indicarea dimensiunilor de gabarit caracteristice [mm], este prezentat în figura 2.12, respectiv în tabelul 2.1.

Dimensiunile sistemelor de scanare utilizate pentru măsurători industriale (fig.2.12) Tab. 2.1

Dim. Var.	A	B	C	D max	E	F	G	H max	J	K	R max
40 W	360	370	475	940	415	30	M10	50	280	20	475
100÷150 W	560	560	800	850	700	70	M16	163	550	70	800
300÷500 W	1200	550	1400	1150	1200	50	Φ36	678	965	40	1400

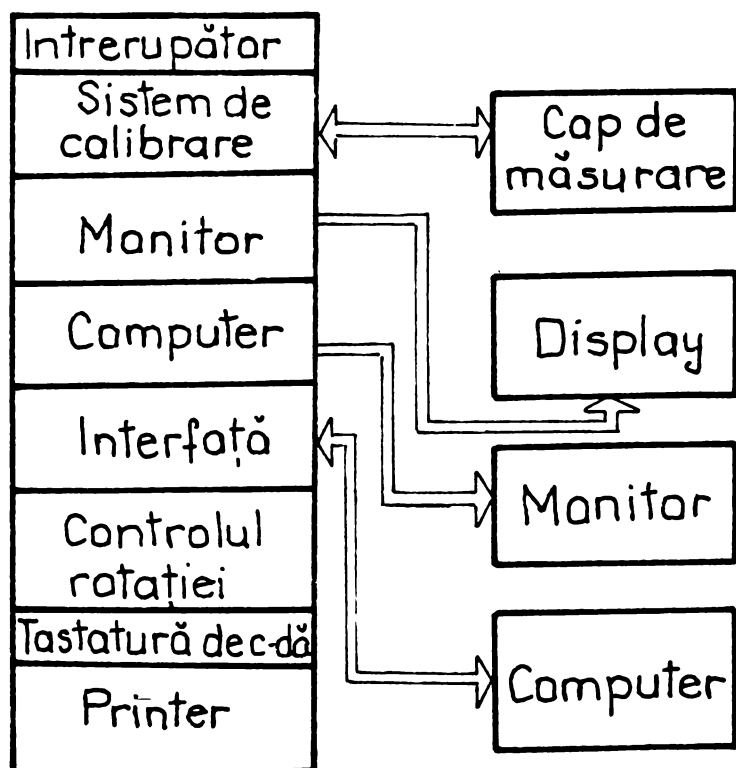


Fig.2.11 Schema bloc a sistemului de scanare utilizat în măsurători industriale

figura 2.1c, e, k.

Performanțele sistemelor de scanare dezvoltate de către firma Bruno&Richter, reprezentative pentru domeniul măsurătorilor industriale, sunt prezentate în tabelul 2.2:

Performanțele sistemelor de scanare Bruno&Richter

Tab. 2.2

Varianța Caract.	1	2	3	4	5	6
Φ util [mm]	40	100	150	200	300	500
Domeniu Φ [mm]	1-35	1-75	2-135	5-180	10-275	20-475
Rezoluție [mm]	0,005	0,01	0,01	0,01	0,02	0,05
Precizie [mm]	$\pm(0,1\%+$ $+0,005)$	$\pm(0,05\%+$ $+0,01)$	$\pm(0,05\%+$ $+0,01)$	$\pm(0,05\%+$ $+0,01)$	$\pm(0,05\%+$ $+0,02)$	$\pm(0,05\%+$ $+0,05)$
Frecv. de scanare	120/s	120/s	120/s	120/s	120/s	120/s
Vit liniară de scanare	150 m/s	300 m/s	220 m/s	300 m/s	560 m/s	930 m/s
Viteza unghiulară	oscilație continuă	36° /s	18° /s 12 rot / min	12° /s 12 rot/min		
Unghiul de rotație	oscilație continuă	0,3°	0,15° 0,6°	0,10° 0,6°		

Se observă că dispozitivul de scanare este de tip potcoavă rotitoare în jurul măsurandului, astfel ca pe display-ul monitorului se poate obține forma completă a secțiunii măsurandului (Fig. 2.13), desigur cu o anumită precizie, rotirea făcându-se cu un anumit increment unghiular.

Observații:

- domeniul util de măsurare nu poate depăși 75% din diametrul sistemelor optice utilizate;
- precizia de măsurare poate fi mărită prin calibrarea pînă la $\pm 0,1\%$ din dimensiunea de măsurat;
- se pot realiza și sisteme de măsurare duble sau multiple (pe două sau mai multe axe) - vezi

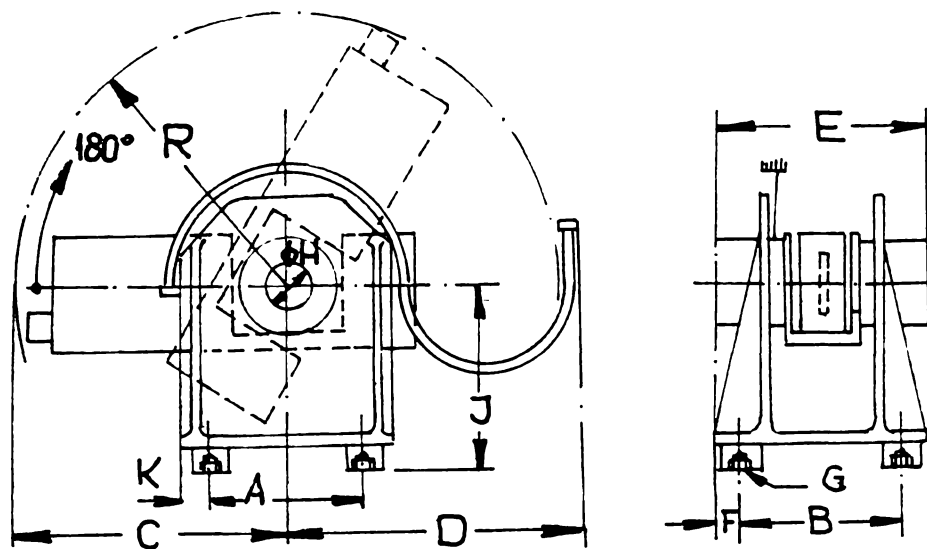


Fig.2.12 Ansamblul aparatului. Dimensiuni de gabarit

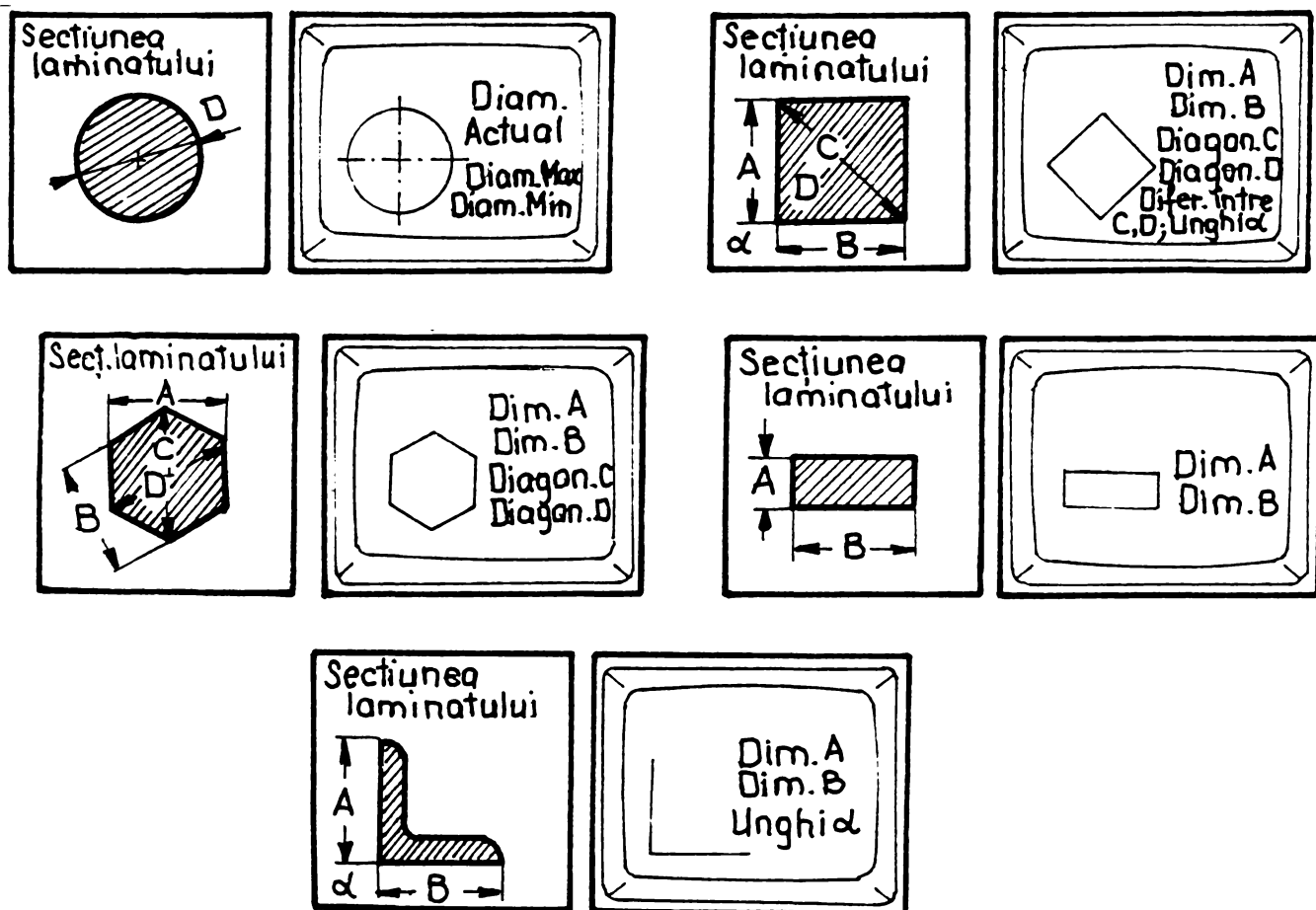


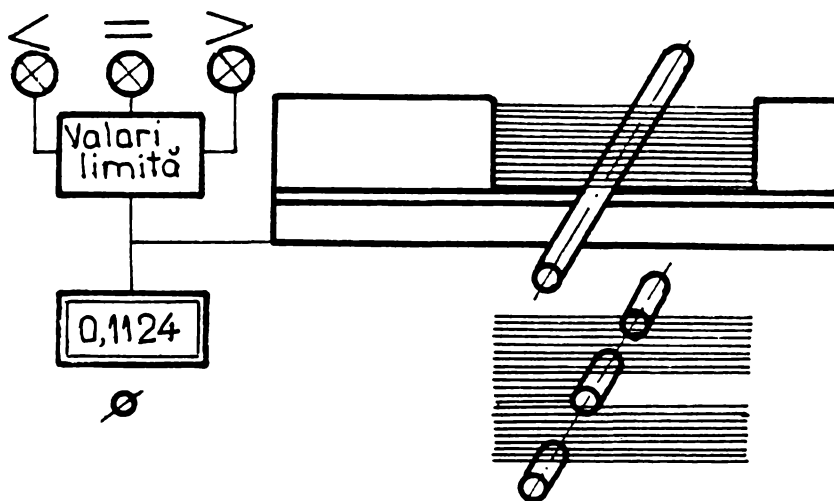
Fig.2.13 Forma măsurandului obținută pe display-ul calculatorului de proces

Dintre aplicațiile posibile ale acestui sistem de scanare, o parte sunt prezentate în tabelul 2.3.

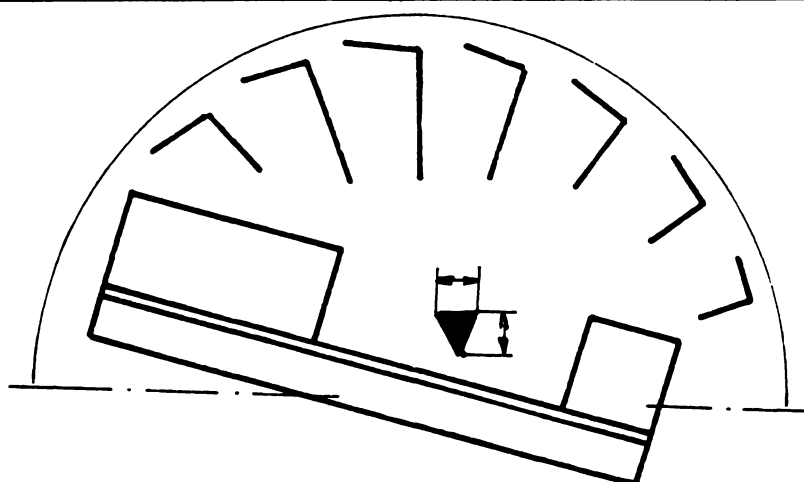
Măsurători dimensionale prin scanare. Aplicații.

Tab. 2.3

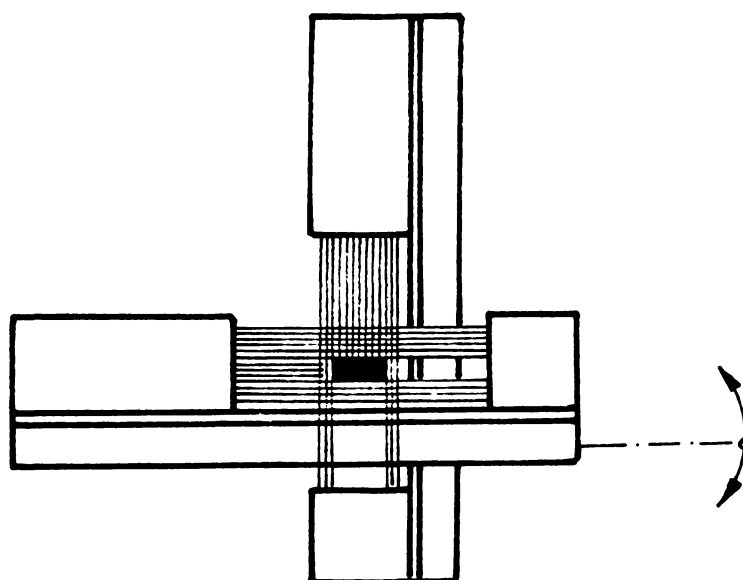
a) Măsurarea în regim continuu a firelor, cablurilor, tuburilor ș.a.



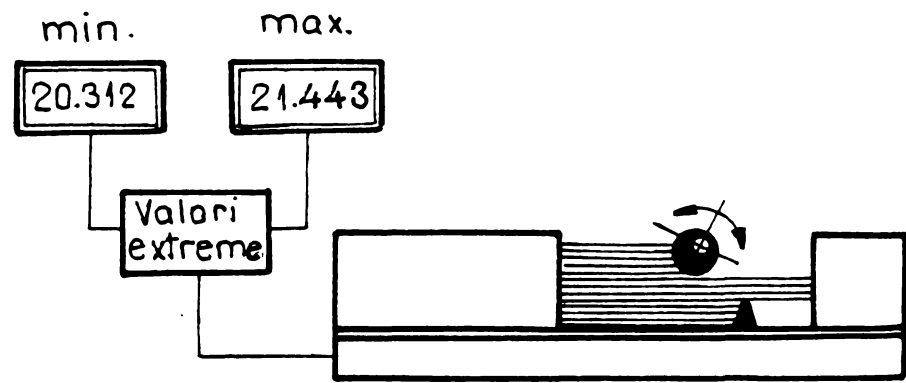
b) -Măsurarea profilului diverselor piese (utilizând capete de măsurare rotitoare);
-Determinarea dimensiunilor extreme, medii ș.a.



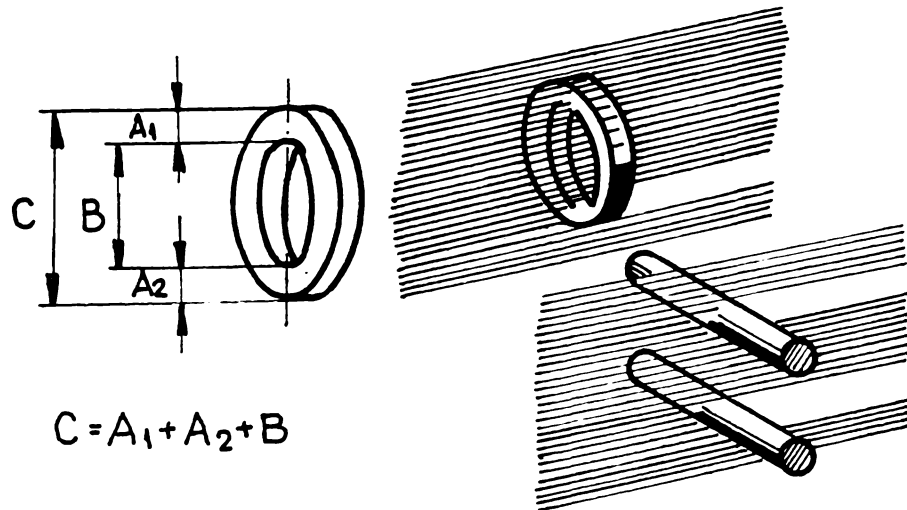
c) Măsurarea profilelor rectangulare cu două capete de măsurare montate într-un dispozitiv rotitor (lățime+gro-sime)



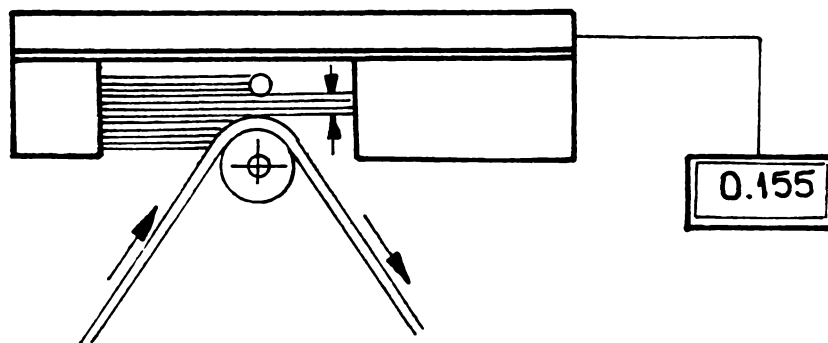
d) Măsurarea excentricității, liniarității, concentricității, indicarea valorilor minime și maxime.



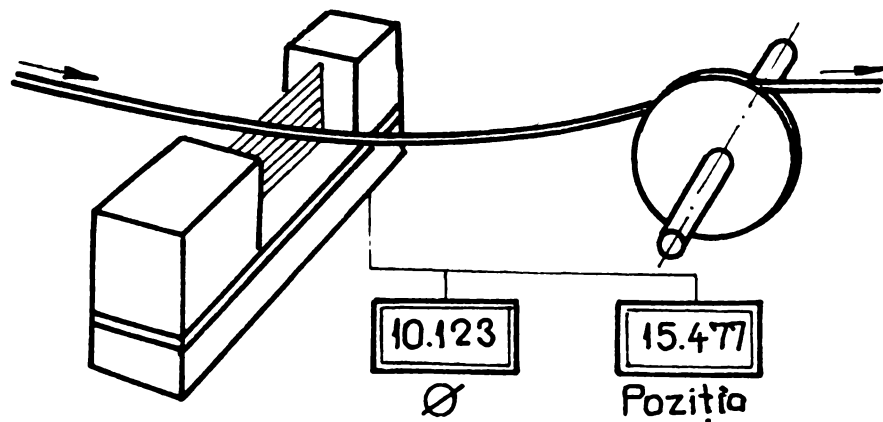
e) -Măsurarea simultană a diametrului interior, exterior și a grosimii pieselor inelare;
-Măsurarea distanței între două piese.

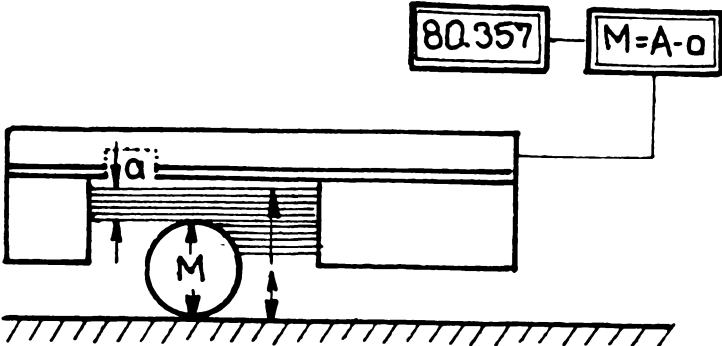
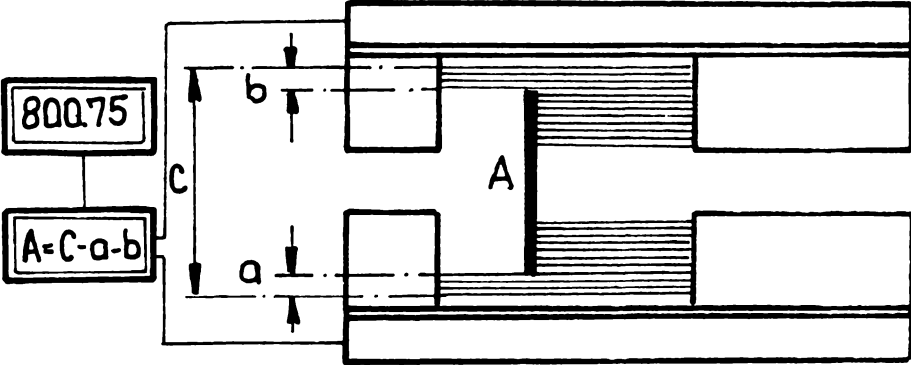
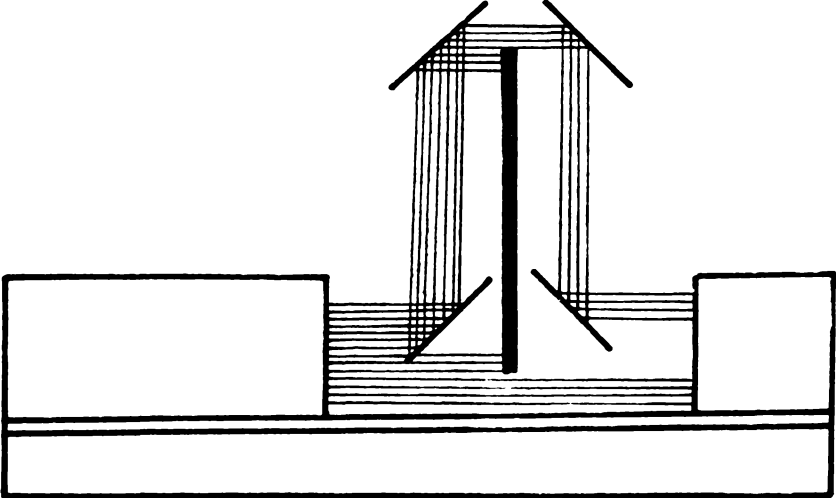
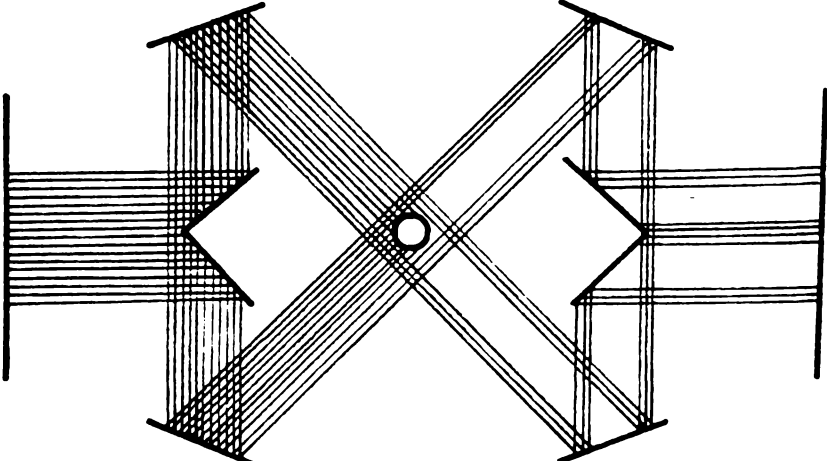


f) Măsurarea grosimii benzilor utilizând cilindri de rotație și repere fixe de referință.



g) Măsurarea diametrului și săgeții, de exemplu pentru controlul întinderii curelelor de transmisie.



<p>h) Măsurarea pieselor de dimensiuni mari cu precizie înaltă, poziționând măsurandul pe un plan de referință</p>	
<p>i) Măsurarea lățimii pieselor</p>	
<p>j) -Divizarea optică a capului de scanare, mărindu-se câmpul de măsurare; -Măsurarea în zone greu accesibile</p>	
<p>k) Divizarea optică a capului de scanare, pentru măsurători simultane în același plan, după două direcții diferite</p>	

2.3.1.3. Surse de erori în procesul de măsurare. Metode de corecție a erorilor.

Prin utilizarea tehnicilor de scanare se pot obține rezoluții de pînă la 1/10.000

din dimensiunea măsurandului, în condițiile în care domeniul de măsurare variază între 10 și 500 mm.

Pentru asigurarea unei asemenea rezoluții, sursele de erori ce intervin în procesul de măsurare trebuie atent controlate și introduse corecțiile necesare. Se practică de asemenea, ca metodă de corecție a erorilor, medierea unui mare număr de scanări a unei aceleiași dimensiuni a măsurandului. Pentru practicarea acestei soluții, atât viteza unghiulară ω de rotație, cât și numărul n de fețe ale oglinzii poligonale (cel mai uzitat tip de cap de scanare) trebuie să fie mari, pentru realizarea unui timp de citire scurt, mai ales când se dorește practicarea controlului on-line al procesului de fabricație pe care este introdus dispozitivul de scanare laser.

În continuare se vor prezenta, din literatura de specialitate, **principalele tipuri de erori** ce apar în procesul de scanare, precum și măsurile specifice care se iau pentru corecția sau evitarea fiecăreia:

A. Erori datorate sursei laser [S6]

Pentru aplicațiile specifice scanării se preferă în general laserele He-Ne, centrate pe lungimea de undă $\lambda = 633$ nm, lasere care prezintă o serie de **avantaje**:

- durată de viață ridicată (zeci de mii de ore de funcționare);
- prețuri scăzute;
- puteri relativ mari (până la 35 mW);
- grad de colimație al fascicolului laser ridicat (divergența fascicolului este de cca. 1 mrad).

Un exemplu de sursă laser indicat în literatură [S6] ca rezultat al analizei performanțelor caracteristice unui mare număr de surse este laserul He-Ne tip LGK 7672 produs de firma Siemens, alimentată la o tensiune de 10÷13 V c.c., funcționând la un curent cu intensitate mai mică de 1A. Dimensiunile de gabarit, de numai 25x50x80 mm îl fac adecvat includerii într-o construcție compactă.

Caracteristicile acestui laser sunt:

- lungime de undă $\lambda = 632,8$ nm;
- putere emisă $P = 2$ mW, mono mod, TEM c.c.;
- divergența $\varphi = 1,2$ mrad;
- diametru fascicul $d = 0,75$ mm;
- tensiune de tub: 1500 V \pm 150 V;
- puterea de aprindere a tubului: 7 kW;
- intensitatea curentului prin tub: 5 mA;
- stabilitatea de putere $\pm 5\%$;
- masa: 300 g;
- dimensiuni: $\Phi 35 \times 280$ mm;
- temperatura de lucru: (-20 ÷ +50)°C;
- timp de viață: peste 10.000 ore de funcționare.

Repartiția de putere pe secțiunea fascicolului laser are alura unei distribuții normale/gaussiene. În figura 2.14a este reprezentată dependența intensității fascicolului în funcție de raza curentă r (distanța de la axa fascicolului la punctul considerat).

Expresia algebrică a densității de putere a laserului în modul de bază este:

$$I_0(r) = \frac{C_0}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{18r^2}{d_L^2}\right] \quad (2.5)$$

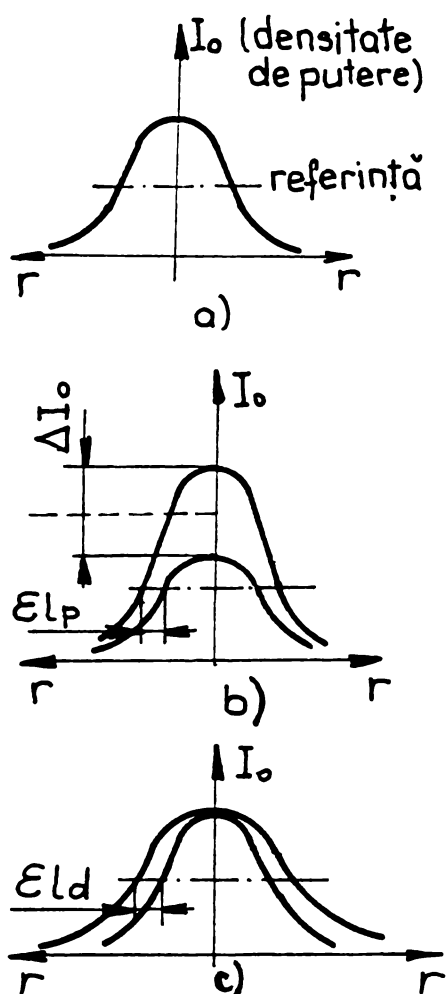


Fig. 2.14 Erori datorate sursei laser

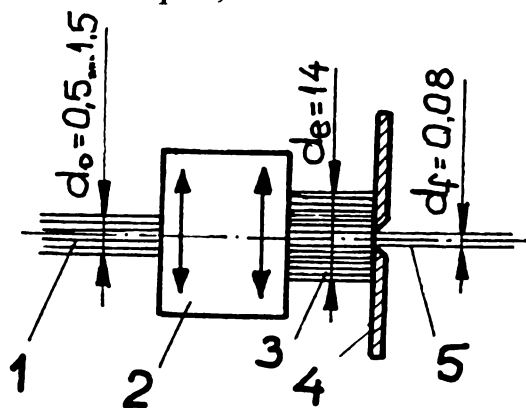


Fig. 2.15 Expandarea razei laser

unde $C_0 = \text{ct.}$, iar d_L este diametrul fascicolului laser.

Eroarea ce apare în procesul de măsurare datorită sursei laser are două **componente**:

A1. eroarea de măsurare datorită stabilității de putere (ϵ_{ip}) - vezi figura 2.14b.

Stabilitatea de putere este o caracteristică a fiecărui laser și este afectată de erori aleatoare. Pentru minimizarea acestei erori trebuie pur și simplu ales un laser cu stabilitatea cât mai bună.

A2. eroarea datorată dimensiunii fascicolului (ϵ_{id}) - vezi figura 2.14c.

Dimensiunea fascicolului este de ordinul a $0,5 \div 1$ mm, iar ϵ_{id} poate atinge chiar $0,1 \div 0,5$ mm, ceea ce este inacceptabil.

Pentru minimizarea lui ϵ_{id} se practică următoarele **soluții**:

- expandarea razei laser inițiale (Fig.2.15) cu ajutorul unui sistem optic special (2), iar din fascicolul de diametru mare rezultat (3), selectarea, cu ajutorul unei diafragme (4), a unui fascicol îngust (5). Eroarea ϵ_{id} scade în acest fel sub $1 \mu\text{m}$;
- poziționarea marginii măsurandului în planul sau cel puțin în vecinătatea planului focal imagine al sistemului optic, astfel încât dimensiunea fascicolului ce palpează măsurandul să fie minimă în zona de măsurare (Fig.2.16).

- Pentru a elimina complet eroarea datorată dimensiunii fascicolului laser, se poate proceda la o divizare electronică a procesului de obturare, respectiv de apariție a fascicolului de după piesa măsurand. Variația intensității semnalului captat de fotodetector la obturare de exemplu va avea alura curbei (1) din figura 2.17, expresia matematică a funcției fiind de tip cosinus. Se poate elimina eroarea datorată diametrului d_L al fascicolului laser marcând

exact momentul în care centrul fascicolului depășește marginea punctului de inflexiune al funcției (1). Se poate spune că s-a determinat practic "centrul fotometric" al fascicolului laser.

Funcția (2) corespunde (Fig.2.17) luării în considerare și a fenomenelor reflexiilor difuze pe suprafața imperfectă a măsurandului, precum și a reflexiilor parazite pe alte fețe a oglinzii poligonale (dacă este cazul). Aceste erori se

compensează prin medierea unui mare număr de scanări la determinarea unei singure dimensiuni.

B. Erori datorate capului de scanare:

B1. Erorile datorate fluctuațiilor vitezei unghiulare ω la capetele de scanare în mișcare de rotație (oglinzi plane sau poligonale rotitoare) pot fi înlăturate prin determinarea lui ω în fiecare moment cu ajutorul unui disc codificator incremental sau cel puțin prin contorizarea numărului de scanări cu o fotodiodă de sfârșit de domeniu de scanare (Cap.3).

B2. Erorile datorate aproximării funcției de scanare $h(t)$ sau $h(\theta = \omega t)$ - vezi Cap. 3.1 - cu o funcție liniară, respectiv aproximarea vitezei de scanare $v = \dot{h}(t)$ cu o constantă. O asemenea aproximare introduce în procesul de măsurare o eroare sistematică ce poate fi calculată cunoscându-se funcția reală de scanare $h(t)$.

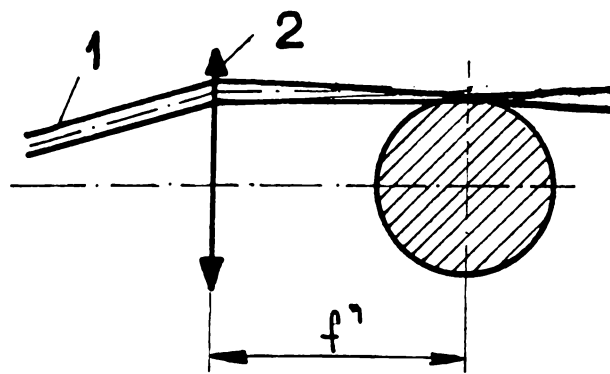


Fig.2.16 Poziționarea măsurandului (3) în vecinătatea planului focal al S.O. (2) pentru colimarea fascicolului laser (1)

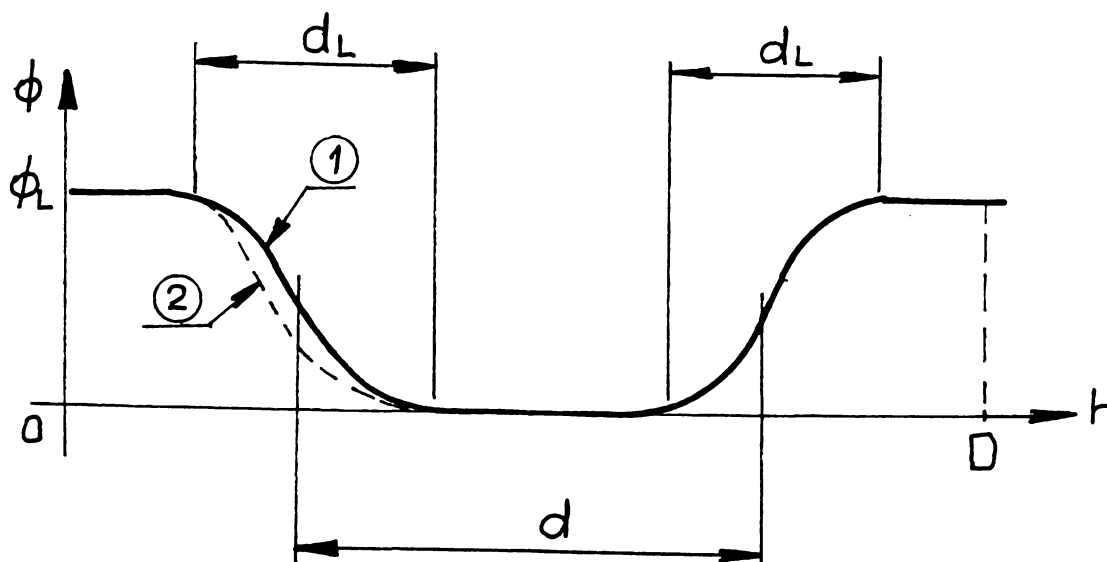


Fig.2.17 Măsurarea dimensiunii "d" marcându-se "centrul fotometric" al fascicolului laser

C. Erori datorate măsurandului:

C1. Eroarea datorată formei măsurandului:

Pentru piese cilindrice introduse în spațiul măsurand, pot apare reflexii parazite (Fig.2.18) pe suprafața cilindrică, astfel încât fotodetectorul primește semnale false. Proiectarea sistemului optic colector trebuie făcută în așa fel încât acest fenomen să nu aibă loc.

C2. Eroarea datorată stării suprafeței:

Rugozitatea suprafeței măsurandului și praful depus duc la o amplificare a fenomenului de difracție a fascicolului laser. În general defocusarea prin difracție a fascicolului se poate neglija, deoarece diametrul δ [μm] al discului de difracție al fascicolului pe muchia de difracție este foarte mic, δ este de aproximativ $1,4x$ numărul de deschidere al sistemului optic:

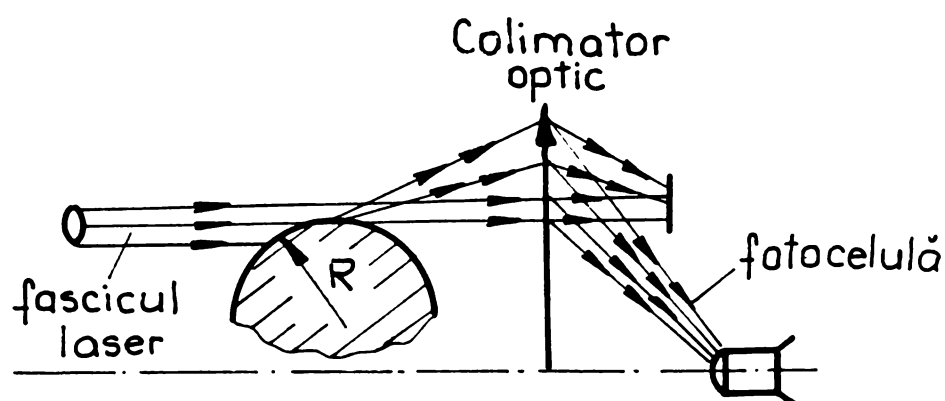


Fig.2.18 Reflexii parazite pe suprafața măsurandului (semnale false)

$$\delta[\mu\text{m}] = 1,4 \cdot \frac{d_L}{f} \quad (2.6)$$

unde d_L = diametrul fascicolului laser; f = distanța focală a sistemului optic. De exemplu, pentru $D_e = 1 \text{ mm}$ și $f = 200 \text{ mm}$, rezultă $\delta = 0,28 \mu\text{m}$.

Intensitatea liniei de difracție este doar 1,6% din intensitatea inițială, deci fenomenul de difracție al fascicolului laser practic nici nu merită luat în considerare. Acesta este motivul pentru care sârme de diametru foarte mic pot fi măsurate cu un fascicol laser puternic colimat.

C3. Eroarea datorată impreciziei de poziționare a măsurandului:

Măsurandul având de exemplu (Fig.2.19) forma secțiunii dreptunghiulară, eroarea ce apare astfel are, pe fiecare din cele două axe, respectiv expresiile:

$$\begin{cases} d_1 = a \sin \varepsilon + b \cos \varepsilon \\ d_2 = a \cos \varepsilon + b \sin \varepsilon \end{cases} \quad (2.7)$$

Pentru o precizie suficient de bună de poziționare, unghiul ε se limitează la 7° .

C4. Eroarea datorată cinematicii măsurandului:

Mișcările măsurandului (Fig.2.20) în direcția x nu au nici o influență asupra măsurătorilor, iar cele în direcția z pot induce o mărire a erorii de măsurare doar în cazul nerespectării paralelismului riguros al fascicolului laser emergent din sistemul optic cu axa optică.

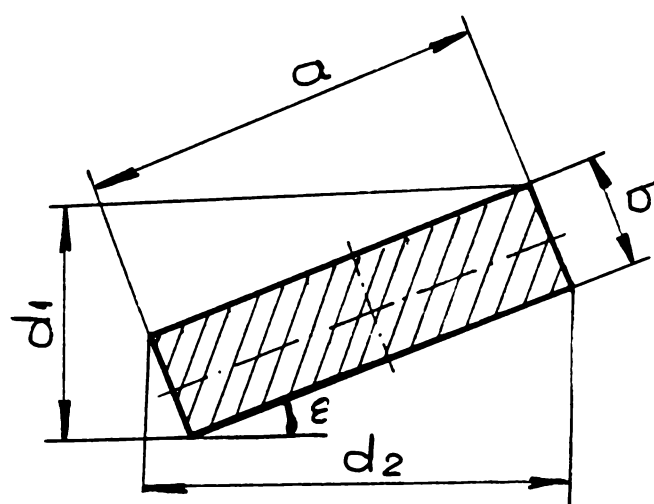


Fig.2.19 Eroarea datorată impreciziei de poziționare a măsurandului

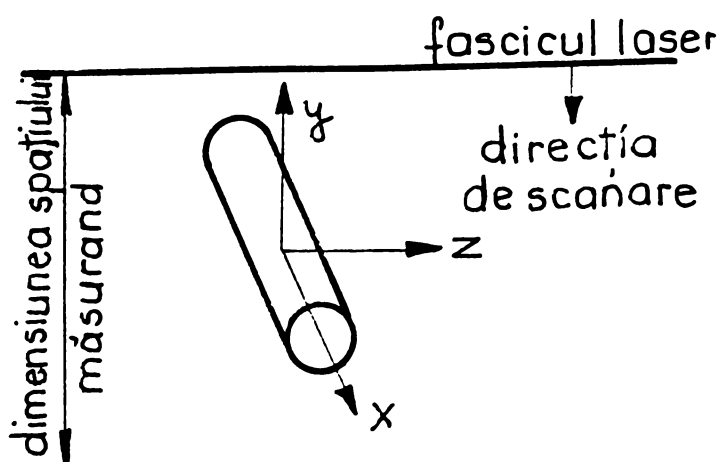


Fig.2.20 Erori datorate cinematicii măsurandului

Deplasările măsurandului în direcția y dau însă, prin efect Doppler, o eroare de măsurare datorată celor două viteze: de scanare (v), respectiv a măsurandului (v_y).

Dacă fascicolul laser și obiectul se deplasează în aceeași direcție, valoarea obținută prin măsurare este mai mare decât valoarea reală a măsurandului; în caz contrar, pentru viteze de sens opus, dimensiunea măsurandului apare mai mică decât cea reală. Fenomenul depinde de: viteza de scanare, frecvența de scanare, mărimea măsurandului și numărul de măsurători mediate pentru o anumită dimensiune.

De exemplu, pentru $v = 125 \text{ m/s}$ și o vibrație a măsurandului cu frecvența de 30 Hz și amplitudinea de 3 mm, incertitudinea de măsurare pentru o scanare individuală este de 0,5% din dimensiunea măsurată.

Acest fenomen face dificil de realizat măsurătoarea pentru o bară laminată de exemplu, cu determinarea integrală a profilului în regim on-line la fiecare 100 sau 200 mm pentru reglarea în timp real a distanței dintre cilindrii laminorului. Pentru realizarea acestui deziderat, se utilizează un sistem de măsurare dual, care măsoară pe două direcții perpendiculare (Tab.2.3.c).

În figura 2.21 se arată situația determinării diametrului unei piese în mișcare după axa x prin medierea rezultatelor mai multor măsurători.

Se observă că frecvența de scanare trebuie să fie suficient de mare, astfel încât scanarea să se facă pe o dimensiune (M_1) pe care dimensiunea măsurată să fie aproximativ aceeași. Dacă frecvența de scanare nu este suficient de mare, măsurarea poate include dimensiuni diferite ale măsurandului, corespunzătoare unei lungimi mai mari după axa x (M_2).

Pentru mărirea frecvenței de scanare, în ideea aplicării variantei capului de scanare rotativ, numărul de laturi a oglinzii poligonale și viteza ei de rotație trebuie să fie suficient de mari. Pentru variante de capete de măsurare oscilante, asigurarea condiției de frecvență de scanare ridicată este mai ușoară.

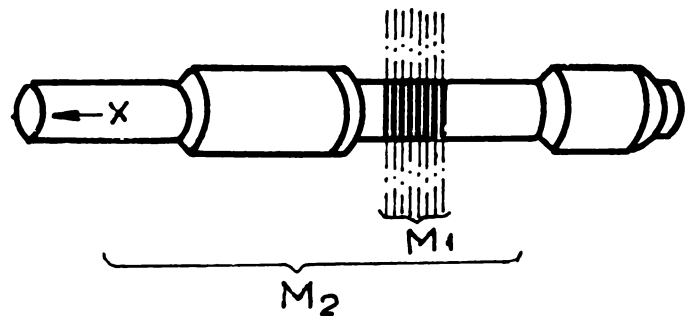


Fig.2.21 Erori datorate trecerilor de secțiune ale măsurandului

2.3.1.4. Metode de corecție a erorilor datorate impreciziilor de realizare a capetelor de scanare:

În paragraful 2.3.1.3 s-au parcurs principalele surse de erori ce afectează dispozitivele de scanare. Cele mai interesante din punct de vedere optomecanic sunt cele legate de construcția capului de scanare. În Cap. 3 se va parcurge un aspect esențial referitor la această sursă de erori, mai precis cel legat de necesitatea obținerii unui fascicul laser (v. fig.3.7) paralel în permanență cu axa optică a sistemului optic refractant. Această cerință sugerează condiții de realizare, respectiv noi soluții constructive pentru scanare (v. § 3.3).

O altă sursă de erori care sugerează noi soluții constructive este așezarea exactă a fațetelor oglinzilor poligonale. Pe lângă posibilitatea utilizării unor tehnologii de fabricație a oglinzii poligon de înaltă precizie (dar și cu cost corespunzător), se utilizează soluții constructive de capete de scanare cu dublă reflexie (fig.2.22):

- a) cu pentaprimă;
- b) cu pentaoglină;
- c) cu oglindă dublă "deschisă";
- d) cu două pentaprisme (varianta "fluture");
- e) cu două oglinzi duble (în variantă "deschisă").

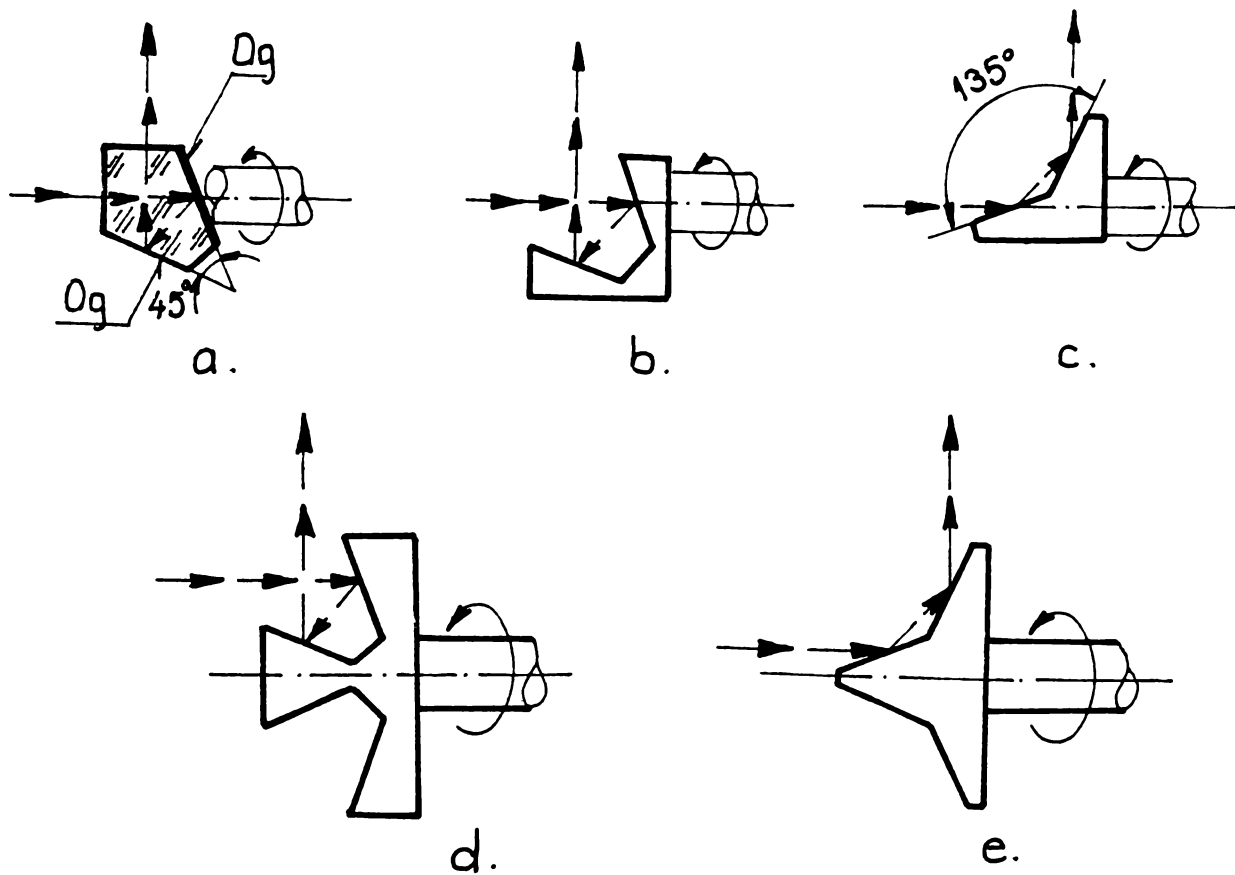


Fig.2.22 Scanere monogon cu dublă reflexie

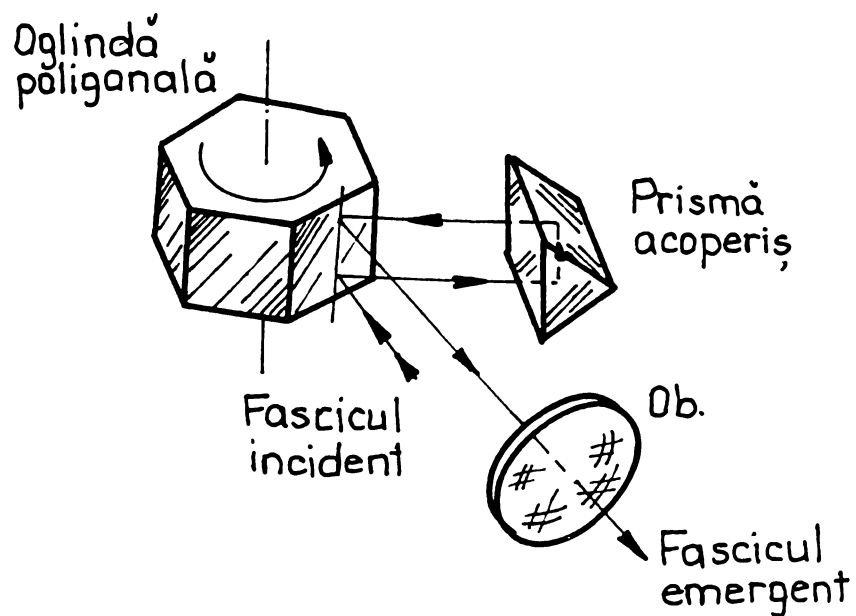


Fig.2.23 Metodă de realizare a dublei reflexii cu o piesă exterioră

Principiul de funcționare constă în anularea erorii unghiulare a spotului datorate înclinării greșite a primei oglinzi prin reflexia, cu un unghi corespunzător diferit, pe cea de a doua oglindă. Se practică atât variantele simple (fig.2.22a, b, c), cât și cele duble (fig.2.22d, e).

O altă posibilitate de materializare a acestui principiu este utilizând un element refractant exterior (o prismă acoperiș în fig.2.23). O înclinare a fascicolului în plan vertical datorată abaterii de la verticalitate a feței poligonului, este corectată analog prin prezența dublei reflexii pe prisma acoperiș.

Cerința esențială a acestei metode este realizarea **simetrică** a elementului reflectant. Are loc astfel un “transfer” de cerință de precizie tehnologică, avantajos din punct de vedere al costului de fabricație.

Concluzie: Se observă că, în realizarea și funcționarea unui dispozitiv de scanare există o multitudine de surse de erori posibile de care trebuie ținut seama în calculul de proiectare, respectiv în instalarea în stație și în menținerea etalonării unui asemenea aparat.

2.3.2. Sistem de măsurare automat prin triangulație laser:

Se folosesc (Fig.2.22) două scanere: Sc.1 și Sc.2.

Principiul de funcționare:

Og. 1, 3 sunt astfel orientate încât raza 1 dă un spot centrat mereu pe CCD. Og. 4 și ansamblul aparatului (distanța “d” dintre Og. 3 și Og. 4 este fixă) se deplasează astfel încât reflexia razei 2 de pe măsurand să se centreze și ea, peste reflexia razei 1, în centrul CCD.

Motoarele pas-cu-pas care acționează Og. 3, Og. 4 și ansamblul aparatului variază unghiul $\theta_1 + \theta_2$ cu un pas incremental de $0,001^\circ$ astfel încât θ_1 să nu difere de θ_2 cu mai mult de $0,001^\circ$, așadar:

$$|\theta_1 - \theta_2| < 0,001^\circ \Leftrightarrow \theta_1 \cong \theta_2 = \theta \quad (2.8)$$

Rezultă distanța R dintre obiectul măsurand și brațul stereoscopic:

$$R = \frac{d}{2} \operatorname{ctg} \theta \quad (2.9)$$

respectiv viteza obiectului:

$$v = \frac{dR}{dt} = -\frac{d}{2} \cdot \frac{\dot{\theta}}{\sin^2 \theta} \quad (2.10)$$

S-au notat: C.D. = cub divizor; Og.3,4 = oglinzi mobile acționate de motoare pas-cu-pas.

Sistemul poate fi utilizat atât în domeniul industrial (la vederea artificială a roboților, de exemplu), cât și în măsurători de teren.

2.3.3 Stereolitografia 3D (S.L.A.)

Modelarea laser 3D/tipărirea tridimensională (S.L.A.) este o metodă de modelare fără hârtie, care permite evitarea unor pași costisitori în convertirea unui proiect CAD într-un model tridimensional.

Principiul metodei constă în utilizarea unei raze laser ce baleiază un fotopolimer. Tehnologia folosește proprietatea acestuia de topire și solidificare la expunerea rapidă cu o rază laser ultravioletă, evident, precis poziționată.

Modul în care sistemele 3D stereolitografice (S.L.A.) folosesc date CAD pentru realizarea unui model complex 3D prin "secționare" orizontală cu un fascicul laser a unei probe de plastic lichid este prezentată în figura 2.23.

În punctul în care raza atinge lichidul, rășina fotopolimerică este expusă și are loc solidificarea, prin treceri succesive, a modelului, constituit din straturi de grosime de pînă la 0,004 inch; timp de realizare: cîteva ore.

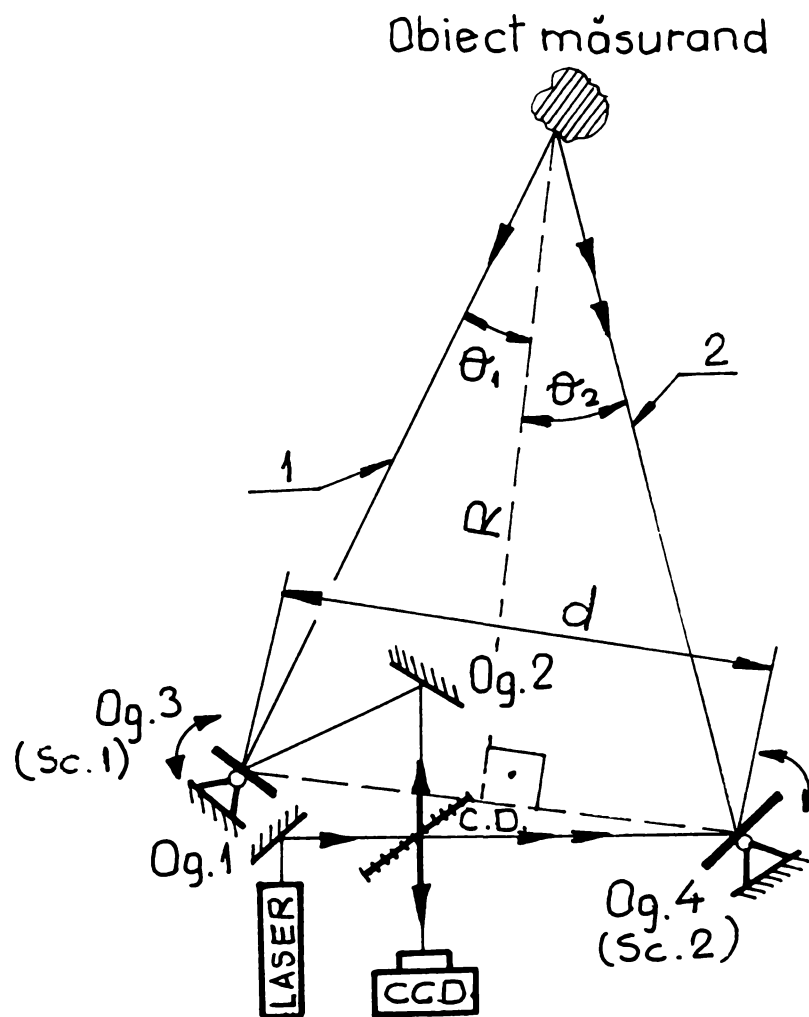


Fig.2.25 Sistem de măsurare automat prin triangulație laser

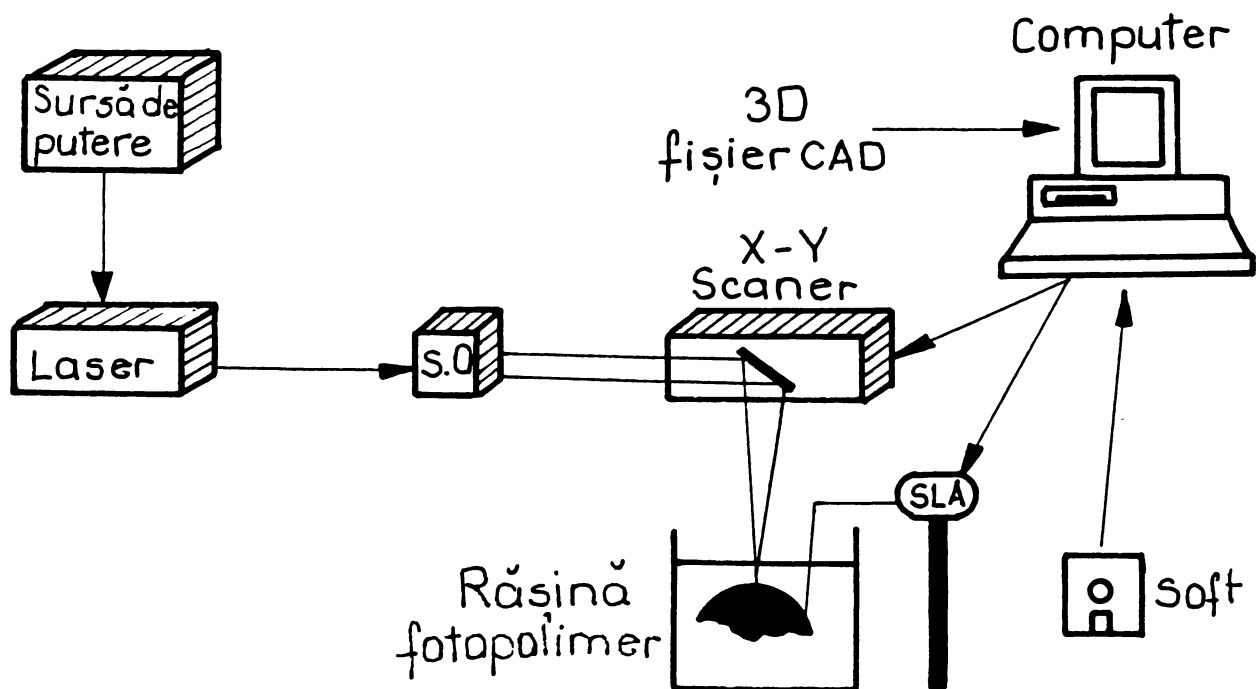


Fig.2.26 Modelarea laser 3D (S.L.A.)

Istoric: Prima realizare notabilă de acest gen aparține anilor 1939, când firma 3D Systems a folosit un sistem SLA standard la producerea matrițelor pentru turnarea sub presiune, folosind o rășină polimerică fotopolimerizabilă, producerea unor tipare

finite direct din supa polimerizabilă în locul procedeelor convenționale, promițând economii enorme în costul SDV - isticii.

Factorii cheie ai procedurii:

- părțile de hard (laser + dispozitiv de scanare) și soft diferite de cele utilizate în mod convențional;
- folosirea unei noi familii de fotopolimeri;

Avantajele metodei:

- economia de timp, efort și bani;
- economia de material: modelul rezultat, deși are o suprafață completă și potrivită finisării, are o structură internă cavernoasă, ceea ce micșorează tensiunile interne și facilitează drenajul lichidului nesolidificat;
- micșorarea riscului dilatării periculoase a materialului turnat asupra miezului ceramic; în cazul miezului din fotopolimeri, când forma este structurată în jurul său și acesta este “ars”, materialul polimeric se prăbușește efectiv în interior.
- realizarea unor piese turnate cu rugozitatea suprafeței mai mică de $80 \mu\text{m}$ în stare nelustruită și sub $20 \mu\text{m}$ după lustruire;
- detectarea precisă a erorilor de proiectare “ascunse” în forma CAD a proiectului și evaluarea corectă a esteticii produsului finit, înaintea începerii producției finale.

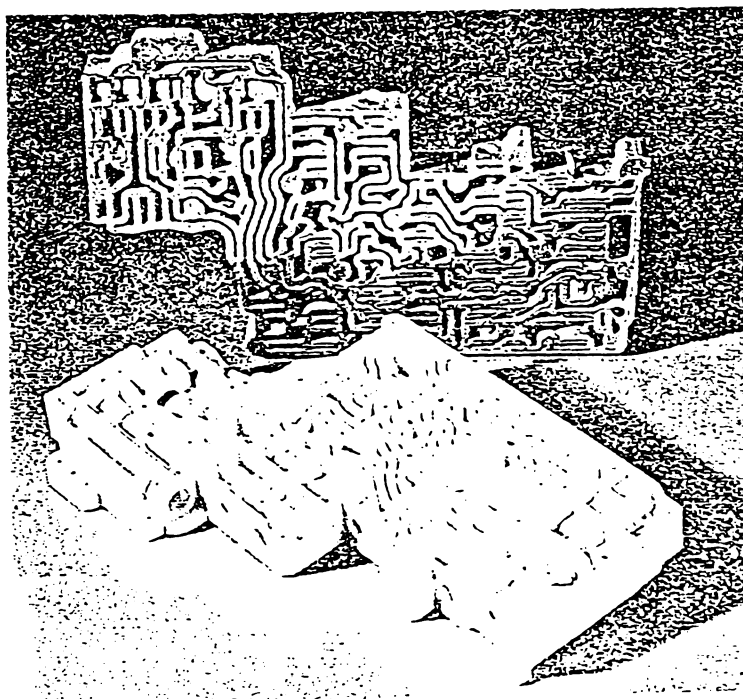
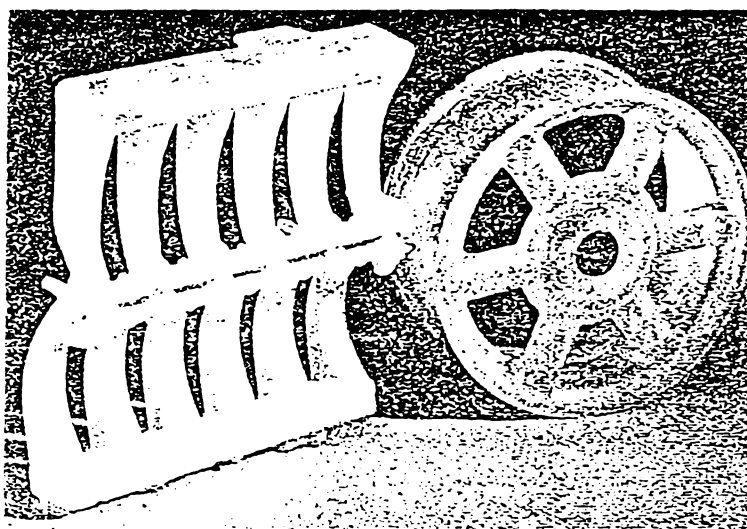


Fig.2.27 Exemple de piese de formă complexă obținute - ca modele - prin S.L.A.

Partea a II-a

ANALIZA ȘI SINTEZA DISPOZITIVELOR DE SCANARE

Capitolul 3

DISPOZITIVE DE SCANARE CU ELEMENTE ÎN MIȘCARE DE ROTAȚIE

Principiul de funcționare al dispozitivelor de scanare cu elemente în mișcare de rotație adaptate pentru măsurători dimensionale a fost deja prezentat în paragraful 2.3.1. În acest capitol se vor considera pe rând principalele variante constructive posibile, procedându-se la analiza lor funcțională din punct de vedere opto-mecanic și stabilindu-se elementele și etapele necesare ale calculului de proiectare, cu indicarea principalelor avantaje și dezavantaje specifice fiecărei soluții. Față de aspectele existente în literatura de specialitate, calculul analitic se va aborda fără ipotezele simplificatoare uzuale [C1]. Partea de sinteză a capului de scanare constituie de asemenea o contribuție față de cele prezentate în literatură [B1].

3.1. Capul de scanare cu oglindă plană rotitoare (monogon)

3.1.1. Funcția de scanare

Schema opto-mecanică a dispozitivului, adaptat pentru măsurători dimensionale, este prezentată în figura 3.1.

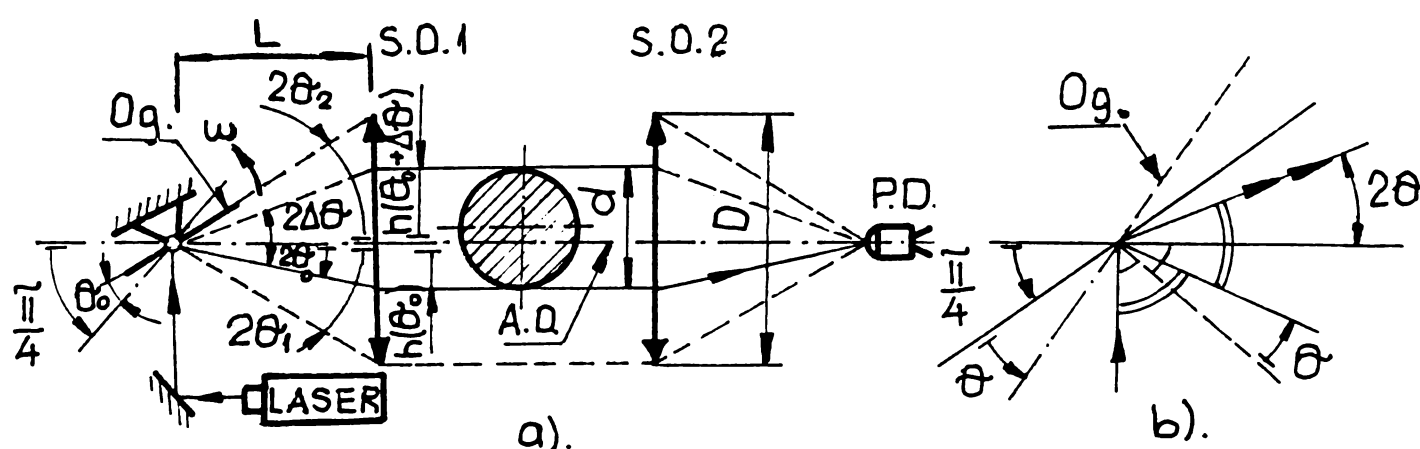


Fig.3.1. Schema de principiu a DS monogon

Oglinda plană care joacă în acest caz rolul capului de scanare poate avea una sau ambele fețe active (reflectante). Varianta cu ambele fețe reflectante are avantajul unei mai bune utilizări a timpului disponibil pentru procesul de scanare, dar are dezavantajul că, datorită grosimii finite a oglinzii, punctul obiect pentru sistemul optic S.O.1. ar "migra" de-a lungul axei optice A.O., ceea ce ar duce la apariția unor erori

față de condiția menținerii unui paralelism strict și permanent al razei emergente din S.O.1. cu A.O.

De aceea în continuare se va prefera varianta în care oglinda rotitoare are o singură față activă (reflectantă) a cărei plan conține axa de rotație a oglinzii, astfel încât punctul obiect pentru S.O.1. rămâne în permanență în punctul A (Fig.3.1). Evident, în acest caz, sistemul S.O.1. va trebui foarte bine corectat de aberația de sfericitate longitudinală.

Funcția de scanare unghiulară este, menținând viteza unghiulară a oglinzii $\omega = ct.$:

$$\theta = \omega \cdot t \quad (3.1.)$$

unde s-a ales la originea timpului ($t=0$), $\theta = 0$ pentru poziția Og înclinată cu $\pi/4$ față de A.O., poziție pentru care raza laser reflectată are chiar direcția A.O.

Funcția de scanare liniară este dată de poziția razei ce parcurge/scanează spațiul măsurând față de A.O. Se observă din fig.3.1. că:

$$h(\theta) = L \cdot \operatorname{tg} 2\theta \quad (3.2.)$$

unde L, distanța de la raza laser fixă la S.O.1., trebuie să fie egală cu distanța focală obiect a acestuia, adică:

$$L = -\bar{f} \quad (3.3.)$$

Domeniul de scanare este definit de unghiurile $\theta_{1,2}$ pentru care raza laser începe, respectiv termină scanarea spațiului măsurând (caracterizat de dimensiunea D utilă a S.O.1,2 -deschiderea pupilei de intrare în plan meridian). Se poate scrie așadar condiția:

$$h(\theta_{1,2}) = \mp D/2 \quad (3.4.)$$

și utilizând relația (3.2.), rezultă:

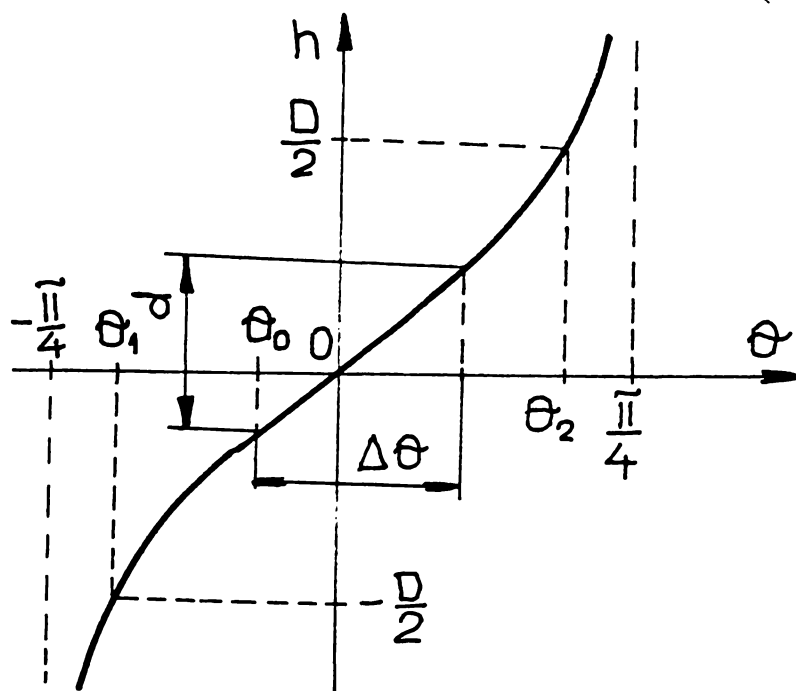


Fig.3.2. Funcția de scanare a DS monogon

$$\theta_{1,2} = \mp \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{D}{2L} = \mp \theta_m \quad (3.5.)$$

3.1.2. Caracteristica de funcționare

Din relațiile (3.1.) și (3.2.) rezultă:

$$h(t) = L \cdot \operatorname{tg} 2\omega t \quad (3.6.)$$

Așadar, **caracteristica de funcționare** a aparatului, dată de dimensiunea "d" a măsurandului se va scrie ca o funcție de două variabile:

t_0 = momentul de timp (față de $\theta=0$ la $t=0$) când raza laser atinge marginea inferioară a măsurandului (moment în care fotodiada FD încetează să mai primească semnal optic) –figura 3.1.a.

Δt = intervalul de timp în care raza laser "parcure" măsurandul. La sfârșitul lui Δt , raza "răsare" pe după marginea măsurandului și FD începe să primească din nou semnal optic.

Dimensiunea "d" a măsurandului după direcția de scanare rezultă:

$$d = h(t_0 + \Delta t) - h(t_0) \quad (3.7)$$

$$\text{dar, ținând cont de (3.1), } d = h(\theta_0 + \Delta\theta) - h(\theta_0) \quad (3.7)'$$

$$\text{unde, evident: } \begin{cases} \theta_0 = \omega t_0 \\ \Delta\theta = \omega \cdot \Delta t \end{cases} \quad (3.8)$$

Efectuînd calculele, cu relațiile (3.2) și (3.7)', rezultă:

$$d = L \frac{\sin 2\Delta\theta \cdot \cos 4\theta_0}{\cos 2(\theta_0 + \Delta\theta) \cdot \cos 2\theta_0} = d(\theta_0, \Delta\theta) \quad (3.9)$$

Din graficul funcției de scanare $h(\theta)$ (fig.3.2) se observă cum, datorită neliniarității lui h , d depinde de ambii parametri, $(\theta_0, \Delta\theta)$, adică este funcție și de așezarea măsurandului în spațiul scanat și nu numai de dimensiunea acestuia în direcția de scanare.

Acest aspect constituie un **dezavantaj** și trebuie luat în considerare în procesul de măsurare printr-un software corespunzător de prelucrare a semnalului de ieșire.

Cazuri particulare:

1. Caracteristica de funcționare de o singură variabilă (măsurand centrat pe axa optică):

Respectarea **condiției de centrare** (avantajoasă dar dificil de realizat practic) a axei măsurandului pe A.O. duce la simplificarea caracteristicii (3.9). Din figura 3.1, condiția de centrare se scrie:

$$2\theta_0 = 2 \cdot \Delta\theta/2 \Rightarrow 2\theta_0 = \Delta\theta \quad (3.10)$$

Înlocuind (3.10) în (3.9), rezultă:

$$d(\Delta\theta) = 2L \frac{\sin \Delta\theta \cdot \cos 2\Delta\theta}{\cos 3\Delta\theta} \quad (3.11)$$

2. Caracteristica de funcționare liniarizată:

Liniarizarea caracteristicii de funcționare se face prin liniarizarea funcției de scanare h .

Se poate scrie **funcția de scanare liniarizată:**

$$h_1(t) = 2L\omega t \quad (3.12)$$

$$\text{aplicînd aproximația lui Gauss: } \text{tg}2\theta \cong \sin 2\theta \cong 2\theta \quad (3.13)$$

$$\text{respectată pentru amplitudini unghiulare mici de scanare: } 2\theta \leq 5^\circ \quad (3.14)$$

Abateră de la funcția reală este:

$$\Delta h = h - h_1 \quad (3.15)$$

Ținînd seama de dezvoltarea în serie Taylor a funcției tg :

$$\text{tg}2\theta = 2\theta + \frac{(2\theta)^3}{3} + \frac{(2\theta)^5}{5} + \dots \quad (3.16)$$

$$\text{rezultă: } \Delta h = \frac{8}{3} L\theta^3 \quad (3.17)$$

și, cum, din relația (3.5): $\theta_m = \frac{D}{4L}$ (3.18)

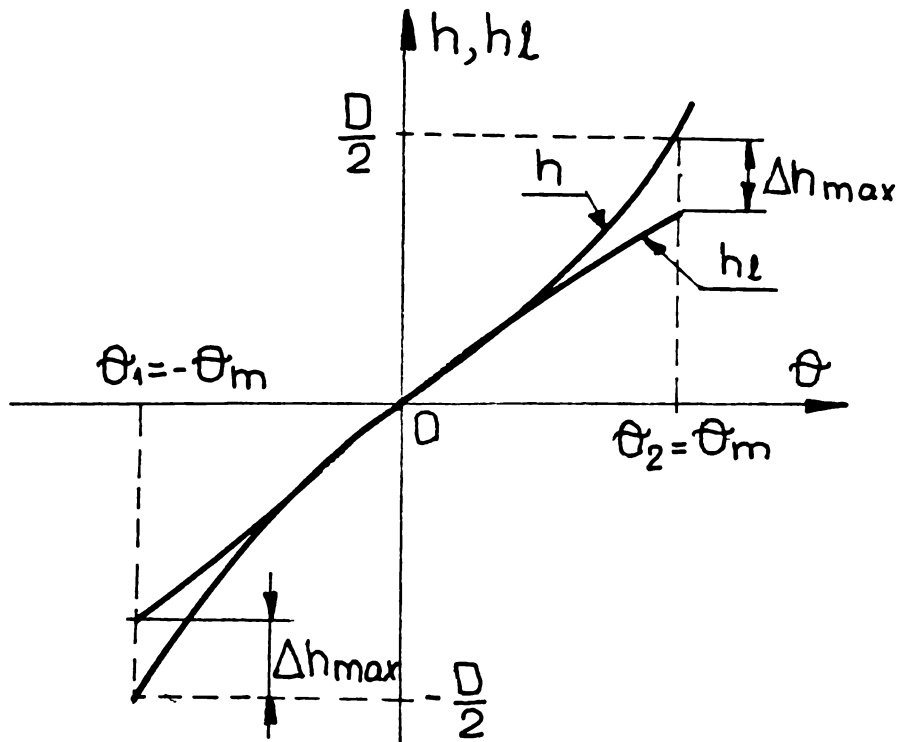


Fig.3.3 Funcția de scanare reală h și liniarizată h_l

abaterea maximă de la funcția reală este (Fig.3.3):

$$\Delta h_{\max} \cong \frac{D^3}{24L^2} \quad (3.19)$$

$$\text{Eroarea de liniaritate: } \varepsilon_1 = \frac{h_l - h}{h} \quad (3.20)$$

$$\text{va avea valoarea maximă: } \varepsilon_{1\max} = \frac{\Delta h_{\max}}{h_{\max}} = \frac{1}{12} \left(\frac{D}{L} \right)^2 \quad (3.21)$$

Problemă: Asigurarea condiției de liniarizare (3.14)

Se realizează prin minimizarea lui θ_m astfel încât: $2\theta_m \leq 5^\circ$. Ținând seama de relația (3.18), rezultă:

$$\frac{D}{2L} \leq \text{tg}5^\circ \Leftrightarrow \frac{L}{D} \geq \frac{1}{2\text{tg}5^\circ} = 5,71 \quad (3.22)$$

Soluția1: Minimizarea lui D

Minimizarea diametrului D a lui S.O.1 în plan meridian se realizează utilizînd soluții de dispunere a măsurandului de tipul celor prezentate în tabelul 2, asigurînd fixînd lărgimi cît mai mici ale domeniului de interpolare (realizîndu-se măsurători comparative). Evident, această posibilitate este limitată de tema de proiectare.

Soluția2: Mărirea lui L

Se urmărește mărirea parcursului razei reflectate în condițiile realizării unei construcții cît

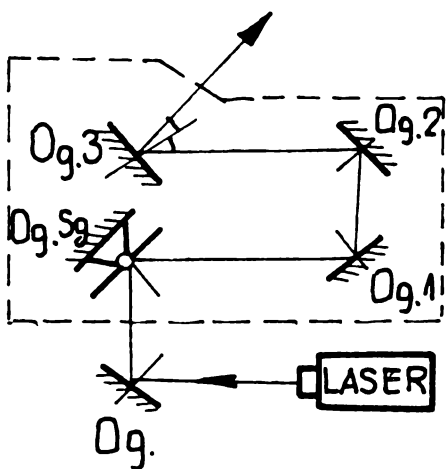


Fig.3.4 Ansamblul de oglinzi plane suplimentare pentru mărirea lui L

mai compacte (gabarit cât mai redus). Se observă din relația (3.20) că mărirea lui L de k ori face ca, la același D , abaterea Δh_{\max} de la funcția reală să scadă de k^2 ori.

3.1.2.1 Dispozitiv cu oglinzi plane suplimentare (fig.3.4):

Se dispun, într-o construcție uzitată, trei oglinzi suplimentare - față de varianta prezentată s-au mai introdus Og. 1,2,3.

Se observă că L crește de mai mult de trei ori: parcursul razei reflectate este cel de la Og.1 la S.O.1, așadar Δh_{\max} scade de mai mult de 9 ori. Teoretic s-ar putea folosi un sistem cu și mai multe oglinzi suplimentare, dar ansamblul s-ar complica nepermis de mult (rezultând dificultăți constructive și de montare, mărirea gabaritului, a masei și a costului de realizare).

3.1.2.2 Dispozitiv cu oglindă-unghi:

Pentru simplitate constructivă și utilizarea unui număr minim de oglinzi - două, s-a dezvoltat soluția ansamblului cu oglinzi unghi (fig.3.5).

Problema a două oglinzi plane care fac între ele un unghi diedru 2φ este bine cunoscută din optica geometrică [B4].

Se demonstrează astfel ușor că pentru o sursă S_0 de lumină poziționată pe planul bisector al unghiului diedru la distanța d față de punctul O (vezi Fig.3.5), se formează N imagini multiple care sunt poziționate pe un cerc $C(0,d)$.

Observație: Se consideră, pentru simplitate, imaginile începând doar cu reflexia pe una din oglinzi (Og.1), caz care corespunde "intrării" în sistem a unei raze incidente inițial pe Og.1.

Într-adevăr, din faptul că imaginea S_{j+1} a "sursei" (sau imaginii) S_j , $j = \overline{0, N-1}$ este simetrică față de oglinda față de care se formează S_{j+1} , $\Delta OS_j S_{j+1}$ este isoscel (OA_j este mediană în triunghi și mediatoare a segmentului $S_j S_{j+1}$), deci:

$$OS_j = OS_0 = d, (\forall) j = \overline{1, N} \quad (3.23)$$

Poziționarea imaginilor multiple S_j pe $C(0,d)$ este dată de unghiul:

$$\theta_j = S_0 \hat{O} S_j \quad (3.24)$$

$$\text{Se observă că: } \begin{cases} \theta_0 = 0 \\ \theta_1 = \varphi + S_0 \hat{O} A_0 = \varphi + S_1 \hat{O} A_0 = 2\varphi \\ \theta_2 = (-1) \cdot (\varphi + S_1 \hat{O} A_1) = (-1)(\varphi + \varphi + |\theta_1|) = -4\varphi \\ \theta_3 = \varphi + S_2 \hat{O} A_2 = \varphi + \varphi + |\theta_2| = (-1)^2 \cdot 6\varphi \end{cases} \quad (3.25)$$

Procedând la demonstrație prin inducție matematică, prin observarea faptului că:

$$\theta_j = (-1)^{j-1} \cdot 2j\varphi \quad (3.26)$$

rezultă: $\theta_{j+1} = (-\sin\theta_j) \cdot (\varphi + S_j \hat{O} A_j) = (-1)^j \cdot 2(j+1)\varphi$
ceea ce era de demonstrat.

Relația (3.26) este valabilă, se observă imediat, și pentru cazul în care $|\theta_j| > \frac{\pi}{2}$, adică pentru situațiile în care se face construcția imaginii în prelungirea oglinzii corespunzătoare.

Numărul N total de imagini multiple care se formează se obține observând faptul că ultima imagine posibilă, S_N , "cade" în interiorul prelungirii laturilor unghiului diedru, iar cea precedentă S_{N-1} , era încă în exteriorul prelungirilor laturilor, adică:

$$\begin{cases} \pi - |\theta_{N-1}| > \varphi \\ \pi - |\theta_N| \leq \varphi \end{cases} \quad (3.27)$$

Introducând relația (3.26) în (3.27), rezultă:

$$\frac{\pi - \varphi}{2\varphi} \leq N < \frac{\pi + \varphi}{2\varphi} \Rightarrow N = \left\lfloor \frac{\pi}{2\varphi} + \frac{1}{2} \right\rfloor \quad (3.28)$$

N este, se observă din construcția din fig.3.5, și numărul total de reflexii posibile pe laturile unghiului diedru pentru o rază incidentă în sistem prin S_0 sub un unghi ε , cu $|\varepsilon| \in (0, \pi/2 - \varphi)$, domeniul unghiular pentru care discuția are sens.

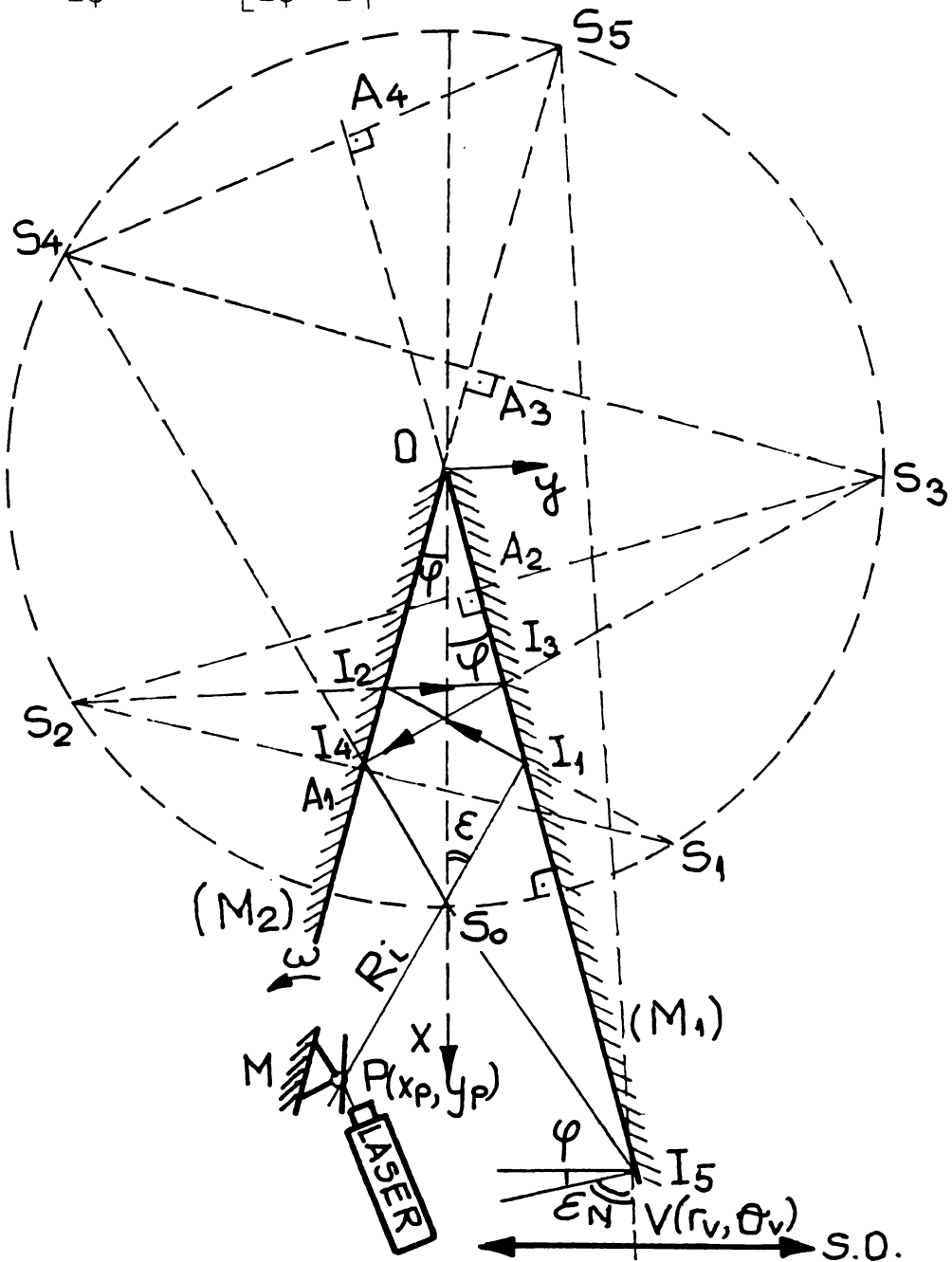


Fig.3.5 Dispozitivul cu două oglinzi - unghi: construcția imaginilor multiple și mersul razelor.

Observație: Construcția se face simplu, ținând seama de faptul că raza $R^{(j)}$, obținută după reflexia "j", este ca și cum ar porni din "sursa" S_j , conform construcției imaginilor în oglinzi plane. Din construcție, deoarece are loc relația (3.27)₁, direcția razei R_e și a dreptei ce reprezintă Og_2 sunt divergente.

Mărirea distanței L, ceea ce constituie scopul discuției, se face **optimizând** funcția $L(\varphi, \varepsilon)$, în sensul obținerii unui **maxim al acesteia**, dar cu respectarea condiției:

$$0 < \varepsilon < \pi/2 - \varphi \quad (3.29)$$

inclusiv pentru valorile extreme ale lui ε , corespunzătoare pozițiilor extreme ale domeniului de scanare.

$$\text{Din fig.3.5 se observă că: } L = \text{pr}_{A.O.} \left[PI_1 + \sum_{j=1}^{N-1} I_j I_{j+1} + I_N I \right] \quad (3.30)$$

unde I = punctul de incidență al razei R_e pe $S.O.1$.

Din considerente geometrice discutate anterior, se poate scrie succesiv:

$$\begin{cases} PS_0 = (x_p - d) / \cos \varepsilon = y_p / \sin \varepsilon \\ S_0 I_1 = S_1 I_1 \\ S_1 I_2 = S_1 I_1 + I_1 I_2 = S_2 I_2 \\ S_2 I_3 = S_2 I_2 + I_2 I_3 = S_3 I_3 \\ \dots \\ S_{N-1} I_N = S_{N-1} I_{N-1} + I_{N-1} I_N = S_N I_N \end{cases} \quad (3.31)$$

unde în cazul considerat, $N = 5$ (fig.3.5).

Din $\triangle OI_N S_N$, scriind teorema sinusurilor:

$$\frac{S_N I_N}{\sin(|\theta_N| - \varphi)} = \frac{d}{\sin \widehat{O\hat{I}_N S_N}} = \frac{OI_N}{\sin \widehat{O\hat{S}_N I_N}} \quad (3.32)$$

și ținând seama că: $\angle OI_j S_j =$ unghi exterior pentru $\triangle OI_j I_{j+1}$, $j = \overline{1, N-1}$

și cum $\widehat{O\hat{I}_1 S_1} = \pi - S_1 \hat{I}_1 A_0 = \pi - (\varepsilon + \varphi)$

$$\text{rezultă: } \begin{cases} \widehat{O\hat{I}_2 S_1} = \widehat{O\hat{I}_1 S_1} - 2\varphi = \widehat{O\hat{I}_2 S_3} \\ \widehat{O\hat{I}_3 S_2} = \widehat{O\hat{I}_2 S_2} - 2\varphi = \widehat{O\hat{I}_3 S_3} \\ \widehat{O\hat{I}_4 S_3} = \widehat{O\hat{I}_3 S_3} - 2\varphi = \widehat{O\hat{I}_4 S_4} \\ \dots \\ \widehat{O\hat{I}_N S_{N-1}} = \widehat{O\hat{I}_{N-1} S_{N-1}} - 2\varphi = \widehat{O\hat{I}_N S_N} \end{cases} \quad (3.33)$$

de unde prin înlocuiri succesive: $\widehat{O\hat{I}_N S_N} = \pi - \varepsilon - 2\varphi(N-1) - \varphi$

$$\text{Rezultă: } S_N I_N = d \frac{\sin(2N-1)\varphi}{\sin[\varepsilon + (2N-1)\varphi]} \quad (3.34)$$

S-a obținut așadar, ținând seama de relațiile (3.30) și (3.31):

$$L = \text{pr}_{A.O.} (PS_0 + S_N I_N + I_N I) \quad (3.35)$$

așadar, înlocuind în (3.35) relațiile (3.31)₁ și (3.34), rezultă:

$$L = \text{pr}_{A.O.} \left(\frac{y_p}{\sin \varepsilon} + d \frac{\sin(2N-1)\varphi}{\sin[\varepsilon + \sin(2N-1)\varphi]} + I_N I \right) \quad (3.35)'$$

pentru o poziție oarecare a oglinzii, respectiv:

$$L = \frac{y_p}{\sin \varepsilon_0} + d_0 \frac{\sin(2N-1)\varphi}{\sin[\varepsilon_0 + \sin(2N-1)\varphi]} + I_N V \quad (3.36)$$

pentru cazul în care raza este reflectată chiar după direcția axei optice A.O., unde trebuie ținut seama și de faptul că:

$$d = x_p - y_p \cdot \text{ctg}\varepsilon = r_p \frac{\sin(\varepsilon - \theta_p)}{\sin\varepsilon} \quad (3.37)$$

Observație: Pentru diferitele poziții ale oglinzii Og_1 , d și ε se modifică, dar N , numărul de imagini formate, rămâne constant, el depinzând numai de φ - vezi relația (3.28).

Chiar odată fixat punctul P de dispunere a oglinzii $Og.1$ a scannerului, sursele S_j , $j = \overline{1, N}$ se "deplasează" funcție de ε pe aceeași rază, dispunându-se pe cercul cu centrul în O și cu noua rază "d".

Mai trebuie determinat $I_N V$. Din figura 3.6, se observă că:

$$\varepsilon_N = \frac{1}{2}[\pi - 2S_N \hat{I}_N O] = -\frac{\pi}{2} + \varepsilon + \sigma \quad (3.38)$$

unde s-a notat: $\sigma = (2N - 1)\varphi$

$$(3.39) \quad \text{Fig.3.6 Determinarea distanței } I_N V$$

$$\text{Din figura 3.6, } I_N V = OI_N \cdot \frac{\sin(\varphi - \theta_v)}{\cos(\varepsilon_N + \varphi - \theta_v)} \quad (3.40)$$

$$\text{unde, din relația (3.32): } OI_N = \frac{d \sin\varepsilon}{\sin(\varepsilon + \sigma)} \quad (3.41)$$

Făcînd succesiv înlocuirile cu (3.41) în (3.40), ținînd seama de (3.38) și revenind în relația (3.36), se obține:

$$L = \frac{r_p}{\sin\varepsilon_0} + d_0 \frac{\sin\sigma}{\sin(\varepsilon + \sigma)} + d \frac{\sin\varepsilon_0}{\sin(\varepsilon_0 + \sigma)} + \frac{\sin(\varphi - \theta_v)}{\sin(\varepsilon_0 + \sigma + \varphi - \theta_v)}$$

Cu relația (3.38), L devine:

$$L = \frac{r_p}{\sin(\varepsilon_0 + \sigma)} \left[\sin(\sigma + \theta_p) + \frac{\sin(\varepsilon_0 - \theta_p) \cdot \sin(\varphi - \theta_v)}{\sin(\varepsilon_0 + \sigma + \varphi - \theta_v)} \right] \quad (3.42)$$

Observații:

$$1^\circ. \text{ Odată } \theta_v \text{ stabilit, rezultă: } r_v = OV = OI_N \cdot \frac{\cos[\varepsilon + (2N + 1)\varphi - 2\theta_v]}{\cos(\varepsilon + 2N\varphi - \theta_v)} \quad (3.43)$$

2°. Divergența razei emergente față de axa de simetrie a oglinzii se produce pentru: $\varepsilon_N = \varphi > \pi/2$

ceea ce, ținînd seama de relația (3.39), înseamnă un unghi: $\varepsilon > \pi - 2N\varphi$ (3.44)
unde N este dat de relația (3.28).

Evident, pentru condiția inversă, cele două drepte converg (punctul lor de intersecție are abscisa $x > 0$).

3°. O problemă interesantă care se poate pune este determinarea distanței dintre punctele de intersecție cu axa Ox a razei ce parcurge sistemul de oglinzi (Fig.3.5):

$$d(S_0, S) = S_N I_N + I_N S = \frac{d}{\sin(\varepsilon + \sigma)} \cdot \left[\sin\sigma - \frac{\sin\varepsilon \cdot \sin\sigma}{\sin(\varepsilon + \sigma + \varphi)} \right] \quad (3.45)$$

Determinarea pozițiilor θ_1 , θ_2 pentru care are loc relația (3.4) de face imediat dacă se cunoaște poziționarea lui $S.O.1$, așadar poziția particulară a Og pentru care reflexia razei laser emergente, R_e , are loc chiar după axa optică (A.O.) a lui $S.O.1$ ($R_e \perp H_1$,

unde $H_1 = \text{planul principal obiect al lui S.O.1}$). Alegerea poziției de $\varepsilon = \varepsilon_0$ se face punând condiția $L = \max.$ și constituie o problemă rezolvabilă doar prin metode numerice.

Odată ε_0 cunoscut, poziția necesară a oglinzii rotitoare relativ la bisectoarea unghiului diedru rezultă (vezi fig.3.6) ținând seama că, din discuția de la începutul paragrafului, raza reflectată are direcția A.O. pentru un unghi între raza laser și cea reflectată de $\pi/2$.

$$\text{Rezultă: } \xi = 3\pi/4 - \varepsilon_0$$

3.1.3. Gradul de acoperire

O problemă majoră a dispozitivului de scanare cu oglindă plană rotitoare este proporția mică din timpul total disponibil care este utilizată efectiv în procesul de scanare. Acest aspect constituie din start un dezavantaj și pentru aprecierea lui se propune introducerea unui parametru numit **grad de acoperire** (prin analogie cu teoria mecanismelor), definit ca raportul dintre intervalul de timp utilizat pentru scanarea spațiului măsurând și intervalul total de timp disponibil. În literatura de specialitate, acesta se regăsește sub denumirea de “duty cycle” (η).

$$\text{Considerînd cazul unei singure rotații, se poate scrie: } \eta = (t_2 - t_1)/T \quad (3.46)$$

unde: $T = \text{timpul total disponibil (perioada de rotație a oglinzii)}$,

$t_{1,2} = \text{momentul în care începe, respectiv se termină scanarea spațiului măsurând (pentru care respectiv } \theta = \theta_1, \theta_2)$.

Deoarece în cazul considerat $\omega = \text{ct.}$, relația (3.46) devine:

$$\eta = (\theta_2 - \theta_1)/2\pi \quad (3.46)'$$

$$\text{și ținînd seama de relația (3.1), rezultă: } \eta = \frac{\arctg \frac{D}{2L}}{\pi} = \frac{2\theta_m}{\pi} \quad (3.46)''$$

Relații între parametrii constructivi și funcționali ai dispozitivului

Se observă din relațiile (3.18) și (3.46) că cele două deziderate: caracteristica lineară și gradul de acoperire cât mai mare sînt contradictorii: una poate fi realizată doar în detrimentul celeilalte. Într-adevăr, din relațiile (3.18), (3.19) și (3.46), se obține:

$$\Delta h_{\max} = \frac{\pi^2 \cdot D}{6} \cdot \eta^2 \quad (3.47)$$

Este adevărat, $\eta < 1$ dar, oricum, neliniaritatea va crește (sau va scădea) proporțional cu pătratul său.

În general, prin tema de proiectare se impun următorii parametri:

- $D = \text{dimensiunea spațiului scanat [m]}$;
- $V = \text{viteza de scanare [m/s]}$;
- $f_s = \text{frecvența de scanare [scanări/s]}$.

Considerînd $v = \text{ct.}$ ($h = 2L\omega t$ - funcție liniară), rezultă:

$$\theta_m = \omega(t_2 - t_1) = \omega \cdot D/V \quad (3.48)$$

$$\text{de unde, ținînd seama că: } \omega = 2\pi \cdot f_s \quad (3.49)$$

se obține din (3.46)'':

$$\varepsilon = 4D \cdot f_s / v \quad (3.50)$$

care constituie relația între parametrii de funcționare ai dispozitivului:

Rezultă imediat L din (3.46) și (3.50) și Δh_{\max} din (3.47), așadar geometria și funcționarea dispozitivului este complet definită.

3.2. Capul de scanare cu oglindă poligonală rotitoare

A. Analiza matematică a dispozitivului

3.2.1. Principiul de funcționare. Funcții caracteristice

Schema de principiu a dispozitivului este prezentată în figura 3.7, indicându-se principalii parametri geometrici ai ansamblului:

R = raza cercului înscris în poligonul regulat cu "n" laturi (apotema).

2α = unghiul la centru ce subîntinde o latură a poligonului;

e = "excentricitatea" razei laser fixe față de axa de rotație a oglinzii (identică cu axa de simetrie a oglinzii poligonale);

L = distanța de la raza laser fixă la planul principal obiect H_1 al sistemului optic S.O.1;

D = dimensiunea maximă de scanare = diametrul pupilei de intrare a S.O.1 în plan meridian.

Principiul de funcționare este identic cu cel de la oglinda plană rotitoare, la fel, notațiile realizate în cazul respectiv se păstrează. Ceea ce diferă în acest caz este discuția matematică, evident mai amplă decât cea realizată în § 3.1.

Pentru determinarea funcției de scanare $h(\theta)$, în figura 3.8 s-a reprezentat o oglindă a poligonului în trei poziții caracteristice, pentru $\theta = \theta_1, \pi/4, \theta_2$, unde $\theta_{1,2}$ sînt

unghiurile pentru care începe, respectiv se finalizează scanarea spațiului măsurand - v. rel. (3.4), unghiuri măsurate față de poziția $\theta = 0$ a apotemei poligonului cu verticala.

În sistemul de coordonate Myz (unde s-a notat $M = P(\theta = \pi/4)$, iar $P(y, z) =$ punctul de incidență al razei pe

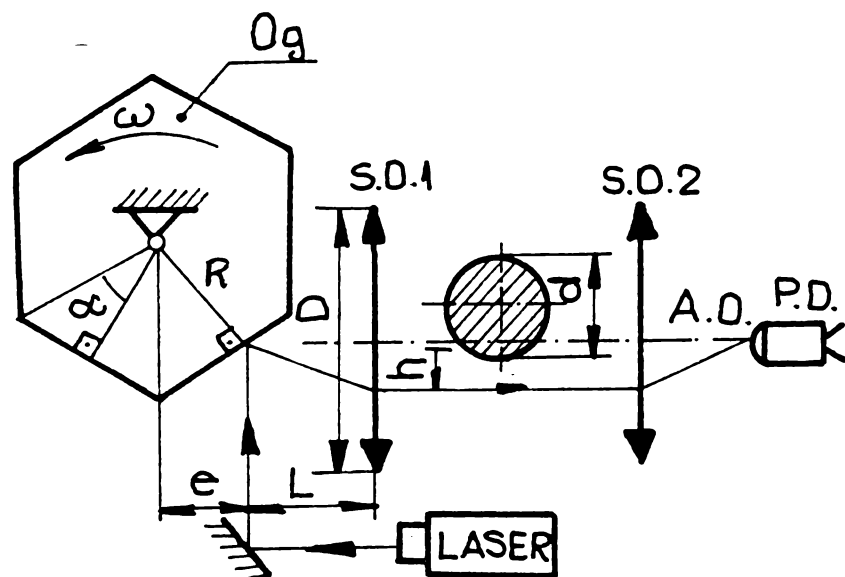


Fig.3.7 Sistem de scanare cu oglindă poligonală rotitoare

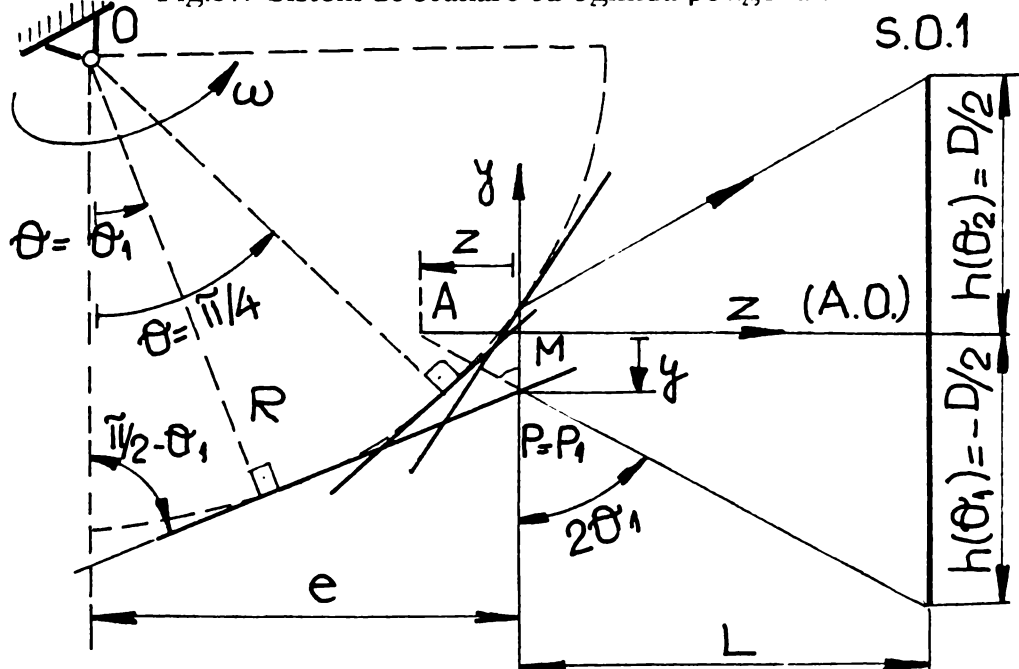


Fig.3.8 Scanarea unei fețe a oglinzii poligonale

oglină), expresia funcției de scanare se observă că se poate scrie:

$$h(\theta) = y(\theta) - L \operatorname{ctg} 2\theta \quad (3.51)$$

$$\text{unde: } y(\theta) = R\sqrt{2} - e - \frac{R}{\cos\theta} + e \cdot \operatorname{tg}\theta \quad (3.52)$$

Se observă, ca un fenomen caracteristic acestui tip de cap de scanare, "migrarea" punctului obiect A al sistemului optic S.O.1 de-a lungul axei optice, punctul A fiind definit de intersecția dintre raza reflectată și A.O. (este ca și cum raza incidentă pe S.O.1 ar porni efectiv din A).

Deplasarea, "migrarea" lui A de-a lungul A.O., este caracterizată de **funcția de "migrare"**:

$$z(\theta) = y(\theta) \cdot \operatorname{tg} 2\theta \quad (3.53)$$

3.2.2 Funcția de scanare

Funcția h este definită pe intervalul $[\theta_1, \theta_2]$. Pentru studiul matematic însă, se va considera o extensie de domeniu, așadar din relațiile (3.51) și (3.52):

$$h: [0, \pi/4] \rightarrow \mathbb{R}; \quad h(\theta) = R\sqrt{2} - e - \frac{R}{\cos\theta} + e \cdot \operatorname{tg}\theta - L \cdot \operatorname{ctg} 2\theta \quad (3.54)$$

1^o. Limitele la capetele intervalului:

$$\lim_{\theta \rightarrow \frac{\pi}{4}} h = 0; \quad \lim_{\substack{\theta \rightarrow 0 \\ \theta > 0}} h = -\infty; \quad \lim_{\substack{\theta \rightarrow \frac{\pi}{2} \\ \theta < \frac{\pi}{2}}} h = +\infty \quad (3.55)$$

relația (3.55)₃ fiind îndeplinită pentru: $e + L/2 > R$ (3.56)
condiție satisfăcută constructiv (în general e este comparabil cu R , iar L este mai mare sau mult mai mare decât R).

2^o. Intersecția cu axele:

$$h(\theta) = 0 \text{ pentru } \theta = \pi/4$$

3^o. Derivata I:

$$\frac{dh}{d\theta} = \frac{e - R \sin\theta + \frac{L}{4 \sin^2\theta}}{\cos^2\theta} \quad (3.57)$$

Observație: Pentru buna funcționare a aparatului este necesară respectarea **condiției de neîntoarcere** a razei, adică scanarea să se facă într-un singur sens:

$$dh/d\theta > 0, (\forall)\theta \in \operatorname{Dom} \theta \quad (3.58)$$

Condiția de mai sus este însă, se observă, în mod automat îndeplinită în practică, deoarece, după cum s-a menționat, distanța L este, prin construcție, în mod sensibil mai mare decât raza R .

Rezultă că funcția $h(\theta)$ este strict crescătoare, iar $\theta = \pi/4$ este rădăcina unică a ecuației $h(\theta) = 0$.

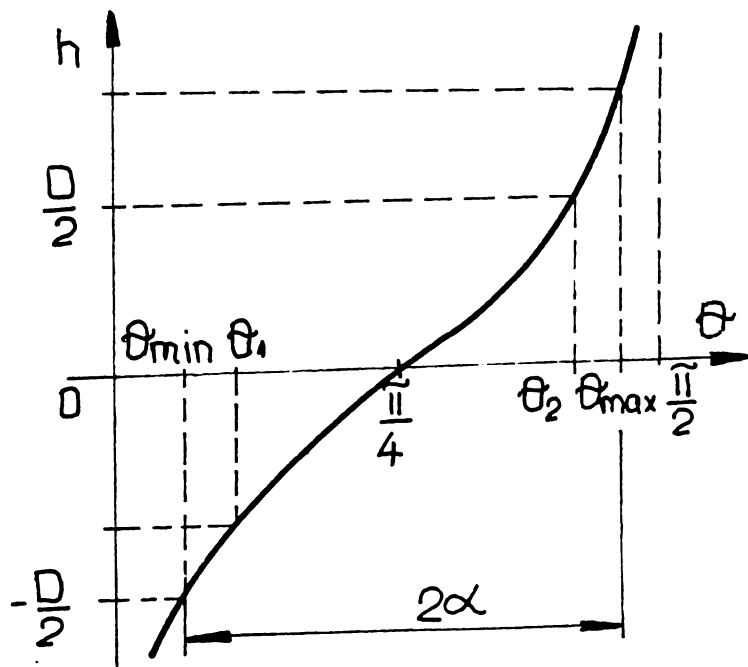


Fig.3.9 Funcția de scanare a DS cu oglindă poligonală

4^o. Derivata a II-a:

$$\frac{d^2 h}{d\theta^2} = \frac{1}{\cos^3 \theta} \left[2e \sin \theta - R(1 + \sin^2 \theta) \right] - 2L \frac{\cos 2\theta}{\sin^3 2\theta} \quad (3.59)$$

Din expresia derivatei se observă că, în general, deoarece condiția:

$$d^2 h / d\theta^2 \neq \theta, (\forall) \theta \in \text{Dom } \theta \quad (3.60)$$

nu poate fi îndeplinită, funcția h este neliniară, adică în general scanarea se face cu viteză variabilă.

5^o. Graficul funcției h

Centralizând rezultatele obținute și făcând observația că:

$$- \lim_{\substack{\theta \rightarrow 0 \\ \theta > 0}} \frac{dh}{d\theta} = \lim_{\substack{\theta \rightarrow \frac{\pi}{2} \\ \theta < \frac{\pi}{2}}} \frac{dh}{d\theta} = +\infty \quad (3.61)$$

graficul funcției de scanare rezultă cu alura prezentată în figura 3.9:

Viteza de scanare are, ținând seama de relația (3.57) și de faptul că $\omega = c \cdot t$, așadar: $\theta = \omega \cdot t$,

$$\text{expresia: } v(t) = \frac{dh}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{\omega}{\cos^2 \theta} \left[e - R \sin \theta + \frac{L}{2 \sin^2 \theta} \right] \quad (3.62)$$

Deoarece s-a impus constructiv condiția (3.56) și limitele la capetele intervalului - rel.(3.4) – sunt cunoscute, pentru definirea completă a alurii graficului funcției v , mai trebuie determinat doar punctul de minim al acesteia, pentru care:

$$\dot{v}(t) = 0 \quad (3.63)$$

ceea ce este echivalent cu rezolvarea ecuației:

$$\frac{d^2 h}{d\theta^2}(\theta) = 0 \quad (3.64)$$

Se observă că punctul de inflexiune al curbei h (minimul lui v) este în $\theta = \pi/4$ dacă și numai dacă:

$$\frac{d^2 h}{d\theta^2} \left(\frac{\pi}{4} \right) = 0 \Leftrightarrow e = \frac{3R}{2\sqrt{2}} \quad (3.65)$$

În general însă, ecuația (3.64) este echivalentă cu:

$$Rx^5 - 2ex^4 + Rx^3 - 2Lx^2 + L = 0 \quad (3.66)$$

unde s-a notat: $x = \sin \theta$

Graficul funcției rezultă, pe baza tuturor considerentelor de mai sus, ca având alura din figura 3.10.

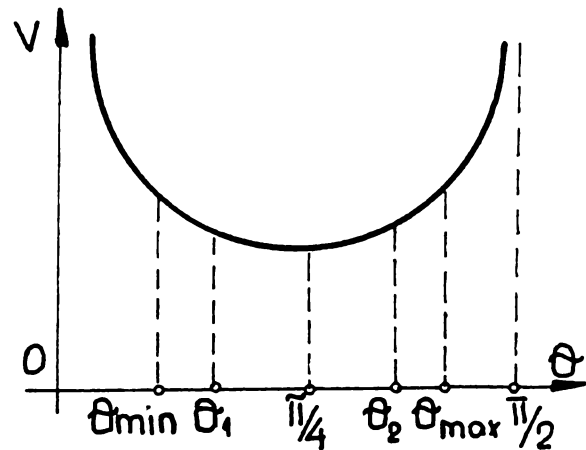


Fig.3.10 Viteza de scanare

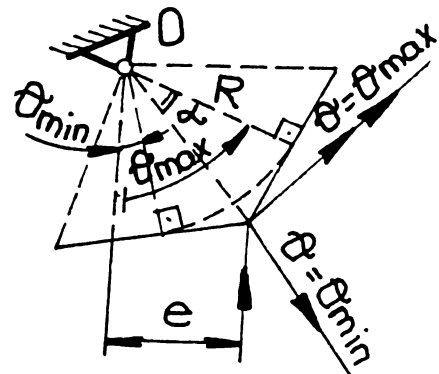


Fig.3.11 Unghiurile de scanare θ_{\min} , θ_{\max}

3.2.3. Gradul de acoperire

În figurile 3.9 și 3.10 s-au notat, pe lângă $\theta_{1,2}$, alte două unghiuri semnificative pentru procesul de scanare: θ_{\min} și respectiv θ_{\max} , care reprezintă unghiurile pentru care începe, respectiv se încheie parcurgerea unei fețe a oglinzii poligonale.

Din figura 3.11 se observă că:

$$\begin{cases} \theta_{\max} - \theta_{\min} = 2\alpha \\ \sin(\theta_{\min} + \alpha) = \frac{e \cos \alpha}{R} \end{cases} \quad (3.67)$$

așadar:
$$\theta_{\min, \max} = \arcsin \frac{e \cdot \cos \alpha}{R} \mp \alpha \quad (3.68)$$

Gradul de acoperire al dispozitivului de scanare, definit prin relația (3.44), rezultă în acest caz, ținând seama că $\omega = ct.$,
$$\eta = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} = n \frac{\theta_2 - \theta_1}{2\pi} \quad (3.69)$$

unde, s-a ținut seama de rel. (3.67)₁, respectiv de faptul că

$$\alpha = \pi/n \quad (3.70)$$

unde n = numărul de laturi ale poligonului.

Concluzie: Comparând relațiile (3.69) și (3.46)', se observă, ceea ce era de așteptat, că la aceleași valori ale unghiurilor θ_1 și θ_2 , gradul de acoperire, așadar eficiența de utilizare a timpului disponibil pentru procesul de scanare este de "n" ori mai mare în cazul oglinzii poligonale decât în cazul oglinzii plane rotitoare, la o aceeași turație a oglinzii.

Discuție:

Cazul 1: $\eta < 1$ pentru $\theta_{\min} < \theta_1 < \theta_2 < \theta_{\max}$ (fig.3.9) (3.71)

ceea ce semnifică faptul că razele extreme sunt reflectate "în afara" dimensiunii D a sistemului S.O.1 (și a spațiului măsurand), adică fotodetectorul FD nu primește semnal optic atât atunci când raza laser întâlnește măsurandul, pentru $\theta \in M = (\theta_0, \theta_0 + \Delta\theta)$ -vezi paragraful 1.b -cât și atunci când raza laser nu întâlnește suprafața lui S.O.1, pentru $\theta \in I = (\theta_{\min}, \theta_1) \cup (\theta_2, \theta_{\max})$.

Acest caz este nesatisfăcător în aparență deoarece întreruperile de flux luminos necauzate de măsurand pot fi "interpretate" ca semnale false de către modulul electronic de prelucrare a semnalelor de la FD.

Cazul poate fi utilizat dacă întreruperile pentru $\theta \in I$ ar putea fi recunoscute (defășurându-se pe același interval temporal) și utilizate ca semnale de "capăt de cursă" (la $\theta = \theta_{\max}$), respectiv de "inițializare" a scanării (la $\theta = \theta_{\min}$).

La construcțiile obișnuite (v. imprimantele laser), aspectul de mai sus este îndeplinit de un fotodetector situat la extremitatea superioară a spațiului măsurand, acesta având și rolul de contorizator al numărului de scanări.

Cazul 2: $\eta = 1$ pentru $\theta_1 = \theta_{\min}$ și $\theta_2 = \theta_{\max}$ (3.72)

caz particular pentru a cărui realizare trebuie corelați parametrii geometrici ai dispozitivului de scanare.

Cazul 3: $\eta > 1$ pentru $\theta_1 < \theta_{\min} < \theta_{\max} < \theta_2$ (3.73)

Și acesta este un caz uzitat, deoarece nu există semnale false, razele extreme (la $\theta = \theta_{\min}, \theta_{\max}$) fiind reflectate "în interiorul" dimensiunii D a sistemului S.O.1 (vezi și figurile 3.9, 3.10 unde diferențele dintre θ_1 și θ_{\min} , respectiv θ_{\max} și θ_2 au fost mult exagerate, pentru o mai bună reprezentare).

Dezavantajul - minor însă - al acestui caz este necesitatea măririi ușoare a lui D pentru a asigura dimensiunea d_{\max} a spațiului de scanare (măsurare) impusă prin tema de proiectare.

3.2.4 Caracteristica de funcționare

Funcția de scanare h fiind și în cazul oglinzii poligonale rotitoare neliniară, caracteristica de funcționare, adică dimensiunea "d" a măsurandului va fi, ca și în cazul oglinzii plane rotitoare (vezi paragraful 3.1.c), o funcție de cele două variabile unghiulare, așezarea măsurandului (notată cu θ_0) și dimensiunea sa în plan meridian (notată cu $\Delta\theta$).

Expresia algebrică a lui d va rezulta, analog cu discuția din paragraful 3.1.2:

$$d = h(\theta_0 + \Delta\theta) - h(\theta_0) = \frac{\sin \frac{\Delta\theta}{2}}{\cos \theta_0 \cos(\theta_0 + \Delta\theta)} \left[2R \sin\left(\theta_0 + \frac{\Delta\theta}{2}\right) + 2e \cos \frac{\Delta\theta}{2} + L \frac{\cos \Delta\theta \cdot \cos \frac{\Delta\theta}{2}}{\sin \theta_0 \sin(\theta_0 + \Delta\theta)} \right] \quad (3.74)$$

Discuție:

1. Liniarizarea caracteristicii d se face prin liniarizarea funcției de scanare h - rel. (3.54). Utilizând și graficul acesteia (Fig.3.9), se pot prefigura trei modalități

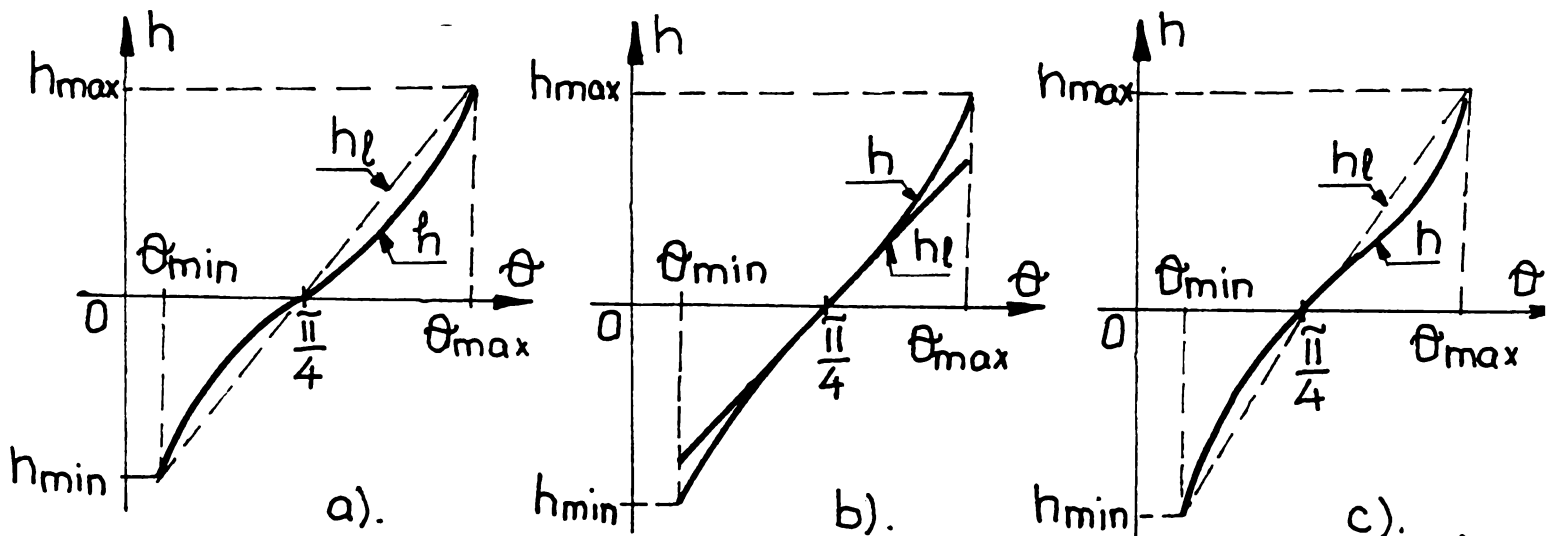


Fig.3.12 Modalități de liniarizare a funcției de scanare

posibile de liniarizare (Fig.3.12):

a) prin unirea punctelor extreme ale graficului G_r , corespunzând extremelor spațiului scanat. Rezultă h liniarizat, h_l , o dreaptă de ecuație: $h_l = a\theta + b$, unde $a, b = \text{ct.}$ (3.75)

care satisface condițiile:
$$\begin{cases} h_l(\theta_{\min}) = h(\theta_{\min}) \\ h_l(\theta_{\max}) = h(\theta_{\max}) \end{cases} \quad (3.76)$$

Se va nota în continuare (Fig.3.12):

$$h_l(\theta_{\min}) = h_{\min} \text{ și } h_l(\theta_{\max}) = h_{\max} \quad (3.77)$$

Înlocuind relația (3.68) în (3.54), rezultă:

$$h_{\min, \max} = R\sqrt{2} - e \frac{R^2}{(C \pm e \sin \alpha) \cos \alpha} + \frac{e \cos \alpha \mp C \cdot \text{tg} \alpha}{C \pm e \sin \alpha} - \frac{L}{2} \frac{(R^2 - 2e^2 \cos^2 \alpha) \frac{\cos 2\alpha}{\cos \alpha} \pm 2eC \sin 2\alpha}{\pm (R^2 - 2e^2 \cos \alpha) \sin \alpha + eC \cos 2\alpha} \quad (3.78)$$

unde s-a notat: $C = \sqrt{R^2 - e^2 \cos^2 \alpha}$ (3.78)

Coeficienții funcției h din rel. (3.75) rezultă, cu condițiile (3.76) rescrise:

$$\begin{cases} a\theta_{\min} + b = h_{\min} \\ a\theta_{\max} + b = h_{\max} \end{cases} \quad (3.80)$$

sub forma:

$$\begin{cases} a = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} \\ b = \frac{\theta_{\max} h_{\max} - \theta_{\min} h_{\min}}{\theta_{\max} - \theta_{\min}} \end{cases} \quad (3.81)$$

unde parametrii ce intervin se calculează respectiv ținând seama de relațiile (3.68) și (3.78).

b) considerând h_1 o dreaptă care trece prin punctul $(\pi/4; 0)$ - figura 3.12.b - de pantă egală cu viteza v a spotului de scanare în acel punct (în dreptul axei optice A.O.):

$$V = \omega \left. \frac{dh}{d\theta} \right|_{\theta=\frac{\pi}{4}} = [(L+e)\sqrt{2} - R] \cdot \omega \sqrt{2} \quad (3.82)$$

funcția de scanare liniarizată se va scrie în acest caz:

$$h_1(t) = [(L+e)\sqrt{2} - R] \cdot \omega t \sqrt{2} \quad (3.83)$$

iar dimensiunea măsurandului rezultă:

$$d_1 = h_1(t_0 - \Delta t) - h_1(t_0) = [(L+e)\sqrt{2} - R] \cdot \omega \cdot \Delta t \sqrt{2} \quad (3.84)$$

așadar, ceea ce s-a dorit, o funcție liniară de o singură variabilă.

Abateră de la cursa reală (o eroare absolută de liniaritate) rezultă:

$$\Delta h(\theta) = (|h - h_1|)(\theta) \quad (3.85)$$

funcție a cărei grafic are aceeași alură cu a curbei h - fig.3.9 (diferă printr-o funcție liniară).

Valoarea maximă a lui Δ se observă (Fig.3.12.b) că se obține la unul din capetele intervalului de scanare, așadar:

$$\Delta h_{\max} = \max\{\Delta h(\theta_{\min}), \Delta h(\theta_{\max})\} \quad (3.86)$$

În figura 3.12.b s-au reprezentat - mult mai exagerat, evident - aceste segmente.

O variantă a acestei soluții de liniarizare o constituie considerarea lui h_1 avînd ca pantă viteza minimă v_{\min} .

c) Prin alegerea lui h_1 o dreaptă care să îndeplinească o condiție de minimizare și uniformizare a abaterii Δh de la liniaritate (Fig.3.12.c), așadar: $\Delta h = \min = ct$ pentru domeniul θ considerat.

Varianta este complicat (și puțin util) de rezolvat analitic, dar abordabilă ușor prin calcul computerizat, punîndu-se condiția ca cel puțin $\Delta h(\theta_{\min}) = \Delta h(\theta_{\max})$.

În cadrul acestei lucrări, pentru simplitate, se va lucra, atunci când este necesar, cu varianta b din cele expuse anterior.

2. Simplificarea caracteristicii, păstrînd însă caracterul ei neliniar, se poate face scriind o **condiție de**

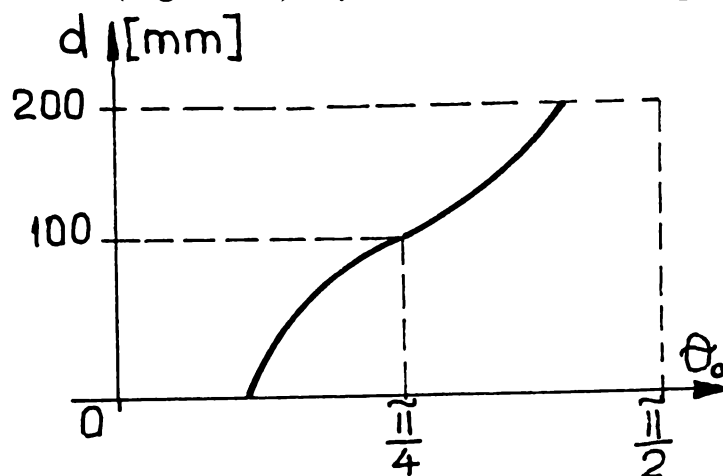


Fig.3.13 Caracteristica de funcționare uniparametrică

centrare similară rel. (3.10), dar ținând seama de modul în care a fost considerat în acest caz unghiul θ (Fig.3.7):

$$2\theta_0 + \Delta\theta = \pi/2 \quad (3.87)$$

S-a considerat, evident, obiectul simetric și avînd axa de simetrie în plan perpendicular pe A.O.

Înlocuind rel. (3.87) în (3.74) rezultă așadar o caracteristică de funcționare de o singură variabilă:

$$d = \left(\frac{1}{\sin\theta_0} - \frac{1}{\cos\theta_0} \right) [R + (e+L)(\sin\theta_0 + \cos\theta_0)] \quad (3.88)$$

a cărei grafic este reprezentat în figura 3.13. S-a considerat un exemplu numeric cu $n=9$; $R=32$ mm; $e=24$ mm; $L=100$ mm. Cu aceste valori, din relația (3.68), au rezultat: $\theta_{\min}=24,81^\circ$; $\theta_{\max}=64,81^\circ$.

B. Sinteza/Calculul de proiectare al dispozitivului

3.2.5 Relații între parametrii constructivi ai dispozitivului

Condițiile care ar trebui puse (Fig.3.9) sînt: $\theta_1 > 0$ și $\theta_2 < \pi/2$ (3.89)

O condiție și mai restrictivă însă (pentru cazul $\varepsilon < 1$) este:

$$\theta_{\min} > 0 \text{ și } \theta_{\max} < \pi/2 \quad (3.90)$$

de preferat deoarece calculul pentru rel. (3.89), datorită expresiei relativ complicată a lui h , nu se poate desfășura analitic. Rămânând așadar în cadrul oferit de rel. (3.90), condițiile de îndeplinit rezultă, utilizând rel. (3.68):

$$\begin{cases} \operatorname{tg}\alpha < \frac{e}{R} \\ e < R \end{cases} \quad (3.91)$$

Relația (3.91)₁ constituie o relație restrictivă pentru numărul de laturi.

Rescriind-o ținând seama că $\alpha = \pi/n$, rezultă: $n > \frac{\pi}{\operatorname{arctg} \frac{e}{R}}$ (3.92)

și utilizînd și relația (3.91)₂, se obține: $n > 4$ (3.93)

așadar poligonul oglindă cap de scanare trebuie să fie cel puțin un pentagon regulat.

Observație: Pentru $n = 3$ sau 4 rezultă $\theta_{\min} < 0$, așadar o situație în cadrul cazului $\varepsilon < 1$, neconvenabilă.

Un alt set de condiții, necoercitiv de această dată, dar extrem de convenabil, este ca spațiul măsurand să fie "situat" atît deasupra, cât și dedesubtul axei optice a.S.O., adică:

$$\theta_{\min} < \pi/4 < \theta_{\max} \quad (3.94)$$

Ținând seama de relația (3.68) rezultă că, pentru ca această condiție să fie îndeplinită, trebuie ca:

$$\operatorname{tg}\alpha > \left| 1 - \frac{e\sqrt{2}}{R} \right| \quad (3.95)$$

Concluzii:

1. Pentru a avea $\eta > 1$ trebuie ca $n \geq 5$, iar pentru ca axa optică să aparțină spațiului scanat, trebuie să fie îndeplinită condiția (3.95).

Centralizând rezultatele, pentru ca: $0 < \theta_{\min} < \pi/4 < \theta_{\max} < \pi/2$ (3.96)

parte Fig.3.7 și 3.8, iar pe de cealaltă parte - Fig.3.14), **condiția de suprapunere** se scrie:

$$L - z(h) = -\bar{f}_h \quad (3.99)$$

Calculul de proiectare va comporta așadar trei **etape**: determinarea funcției $z(h)$, studiul aberației cu obținerea lui \bar{f}_h și suprapunerea funcțiilor obținute.

1) Determinarea funcției $z(h)$

Se dispune pentru aceasta de funcțiile $z(\theta)$ - rel. (3.53) și $h(\theta)$.

Se observă că obținerea pe cale analitică a lui $z(h)$ nu se poate realiza datorită formei complicate a lui $h(\theta)$, care ar implica, pentru determinarea funcției inverse $\theta(h)$, rezolvarea unei ecuații transcendente.

Trebuie apelat așadar fie la metode grafice, fie la metode numerice.

În figura 3.15 s-a realizat astfel construcția pe cale grafică a curbei $z(h)$ dispunându-se de curba $h(\theta)$ - vezi Fig.3.9, și de curba $z(\theta)$ - vezi Anexa 2.2.

De asemenea, în Anexa 2.2, s-a obținut $z(h)$ tabelar, corelându-se valorile parametrilor θ, h și z .

Observație: Este posibilă dar neconvenabilă, necesitând un volum de calcul fără un aport informațional util, aproximarea lui h prin funcții de interpolare (de exemplu prin două polinomiale de gr. II), cu obținerea apoi a dependenței $\theta(h)$, motiv pentru care s-a apelat, pentru determinarea lui $z(h)$ strict la metode numerice.

2) Determinarea aberației de sfericitate axială

Preluând din literatură rezultatele de interes pentru discuția de față, curba aberației de sfericitate longitudinală are alura din figura 3.16 pentru: a. lentilă (Anexa 2.1); b. dublet corectat de această aberație (Anexa 2.4).

3) Realizarea condiției de suprapunere (3.99)

Aceasta se poate face, evident, doar într-un număr finit de puncte de precizie (vezi Anexele 2.3 și 2.5). Sunt așadar câteva aspecte care trebuie studiate:

a. determinarea erorii de suprapunere rezultante: $\Delta s = L + \bar{f}_h - z(h) \quad (3.100)$

și mai ales, a efectului acesteia;

b. înclinarea razei emergente din S.O.1 (β) funcție de h : se realizează prin drumuire trigonometrică directă cunoscându-se poziția lui A, dată de: $a_h = L - z(h) \quad (3.101)$ și înălțimea de incidență h .

Rezultă (vezi Fig.3.16) înălțimea h_i a punctului de incidență I al razei laser pe un ecran E situat la distanța l de planul principal imagine al S.O.1:

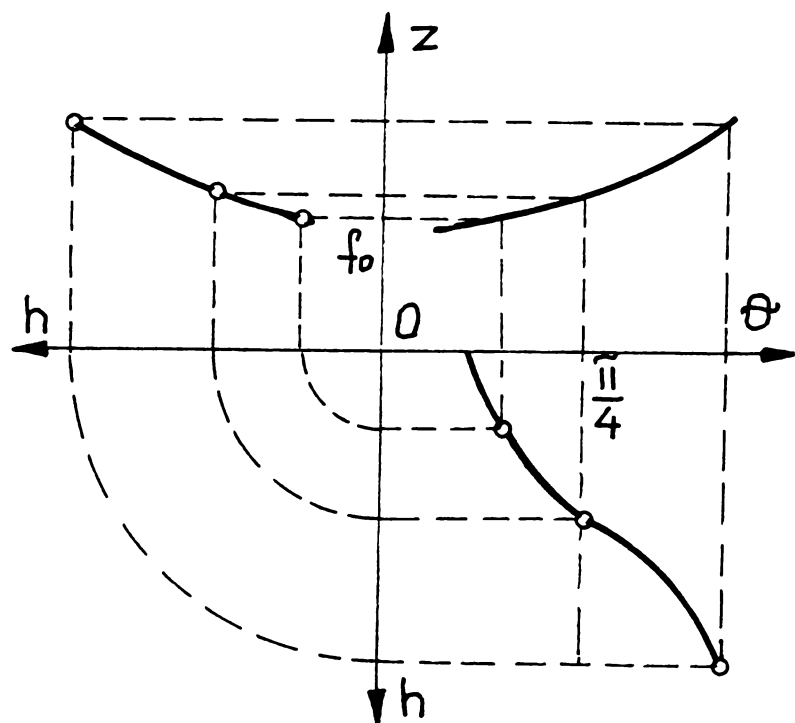


Fig.3.15 Determinarea graficului funcției de migrare $z(h)$

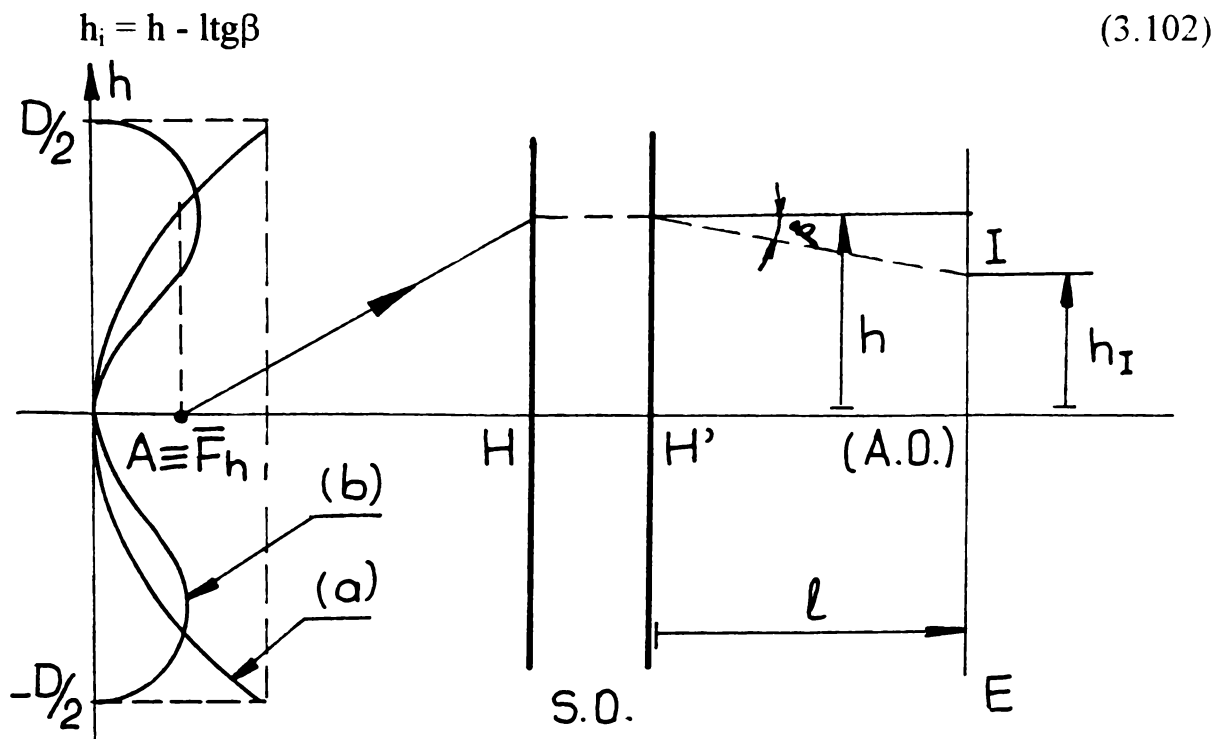


Fig.3.16 Alura curbei aberației de sfericitate longitudinală

Minimizarea erorilor de suprapunere se poate face prin mai multe metode:

Metoda 1: alegerea unui S.O. având curba de aberație, respectiv graficul lui $-\bar{f}_h$, cât mai apropiat de curba $L - z(h)$ obținută și alegerea parametrilor capului de scanare astfel încât suprapunerea dată de rel. (3.99) să fie cât mai bună. Una din cele mai bune căi în acest sens este mărirea numărului n de laturi ale poligonului, cu restrângerea așadar a domeniului unghiular de scanare:

$$\text{Dom}\theta = \theta_{\max} - \theta_{\min} \quad (3.103)$$

de asemenea micșorând gabaritul oglinzii (dimensiunea R , implicit e).

Metoda 2:

Principiul metodei constă din minimizarea (sau anularea chiar, dacă este posibil) a migrării Δz a punctului A , proiectînd S.O.1 supracorectat de aberația de sfericitate longitudinală, obținerea unor astfel de sisteme fiind un aspect tratat în literatura de specialitate [B3].

În cel mai dezavantajos caz, Δz trebuie să rezulte oricum mai mic decât ds_h , adică "migrarea" lui A trebuie să se producă în "interiorul" intervalului corespunzător aberației de sfericitate.

Condiția de proiectare este așadar, pe baza discuției de la metoda 1 - vezi

relațiile (3.99) ... (3.101) și figura 3.15:
$$\begin{cases} a_0 = L - z_0 < -\bar{f}_0 \\ a_H = L - z_H < -\bar{f}_H \end{cases} \quad (3.104)$$

unde s-a notat: $H = \{h | z(h(\theta)) = \max, \theta \in (\theta_{\min}, \theta_{\max})\} \in \{h(\theta_{\min}), h(\theta_{\max})\}$ (3.105)

Condiția (3.104) se mai poate scrie:

$$\begin{cases} z_0 > L + \bar{f}_0 \\ \Delta z = \max \{ \Delta z(\theta_{\max}), \Delta z(\theta_{\min}) \} < ds_h \end{cases} \quad (3.106)$$

unde s-a notat: $\Delta z = z(\theta) - z_0$ (3.107)

și: $ds_h = \bar{f}_h - \bar{f}_0$ (3.108)

Valoarea lui z_0 :

$$z_0 = z|_{h=0} = z|_{\theta=\frac{\pi}{4}}$$

se observă, din relațiile (3.53) și (3.52) că duce la o nedeterminare:

$$\lim_{\theta \rightarrow \frac{\pi}{4}} z = \lim_{\theta \rightarrow \frac{\pi}{4}} \left(R\sqrt{2} - e - \frac{R}{\cos\theta} + e - \operatorname{tg}\theta \right) \cdot \operatorname{tg}2\theta = 0 \cdot \infty$$

Aplicînd regula lui l'Hospital, se obține:

$$z_0 = \lim_{\theta \rightarrow \frac{\pi}{4}} z = \frac{R - e\sqrt{2}}{2} \quad (3.109)$$

Observație: Cum era de așteptat, $z_0 = 0$ dacă și numai dacă raza laser fixă este poziționată cu excentricitatea $e = R \frac{\sqrt{2}}{2}$ față de punctul O, aspect ce se verifică imediat din figura 3.8.

Valorile lui z pentru pozițiile extreme ale razei laser sunt, tot cu relațiile (3.53), (3.52):

$$z(\theta_{\min, \max}) = \left[R\sqrt{2} - e - \frac{R}{\cos(\gamma \pm \alpha)} + e \cdot \operatorname{tg}2(\gamma \pm \alpha) \right] \cdot \operatorname{tg}2(\gamma \pm \alpha) \quad (3.110)$$

unde s-a notat:

$$\gamma = \arcsin \frac{e \cdot \cos\alpha}{R} \quad (3.111)$$

Concluzie: Va trebui așadar minimizat Δz - convenabil prin studiu computerizat, datorită expresiei complicate - alegîndu-se convenabil parametrii n, R, e pentru aceasta, cu respectarea condiției (3.106)₁. Trebuie ținut seama de faptul că acest Δz trebuie făcut mai mic decît valoarea ds_h a aberației unui S.O.1 supracorectat de aceasta.

Pentru aceasta, alegîndu-se n și reprezentând pînza $\Delta z(R, e/R)$, rezultă valorile R, e care, pentru fiecare n , îndeplinesc condiția de mai sus (cu respectarea, în alegerea inițială a domeniilor lui R și $x = e/R$, a condițiilor obținute la paragraful 3.2.5).

Discuția trebuie purtată separat în continuare funcție de valorile lui η .

Cazul $\eta > 1$: Cu valorile n, e, R obținute se calculează $\theta_{\min}, \theta_{\max}$ - rel. (3.68).

Rezultă domeniul de măsurare (dimensionarea maximă a măsurandului):

$$d_{\max} = h(\theta_{\max}) - h(\theta_{\min}) \quad (3.112)$$

respectiv diametrul necesar al lui S.O.1:

$$D = 2 \max\{h(\theta_{\max}), h(\theta_{\min})\} = 2H \quad (3.113)$$

Dimensiunea L se alege constructiv, din condițiile de gabarit și de minimizare a neliniarității funcției de scanare h (vezi §3.2.4), dar în corelație evident cu alegerea S.O.1, de fapt a distanței focale obiect în paraxial a acestuia, pentru respectarea condiției (3.106)₁.

Cazul $\eta = 1$: are loc (paragraful 3.2.5) dacă și numai dacă:

$$\theta_1 = \theta_{\min}; \theta_2 = \theta_{\max} \quad (3.114)$$

Din condiția $h(\theta_{1,2}) = \mp \frac{D}{2}$ va rezulta atunci, ținînd seama de expresia lui h - rel.

(3.51), un sistem de două ecuații cu două necunoscute, L și D :

$$R\sqrt{2} - e - \frac{R}{\cos(\gamma \mp \alpha)} + e \cdot \operatorname{tg}(\gamma \mp \alpha) - L \cdot \operatorname{ctg}2(\gamma \mp \alpha) = \mp \frac{D}{2} \quad (3.115)$$

Efectuând calculele, rezultă:

$$\begin{cases} L = \frac{2(R^2 - e^2)(e^2 \cos^2 \alpha - R^2 \sin^2 \alpha) \cos \alpha}{e(R^2 - 2e^2 \cos^2 \alpha) \sqrt{R^2 - e^2 \cos^2 \alpha}} \left[R\sqrt{2} - e - \frac{(R^2 - e^2 \cos^2 \alpha)^{3,2}}{(R^2 - e^2) \cos^2 \alpha} \right] \\ D = L \cdot \frac{R^4 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos 2\alpha}{(R^2 - e^2)(e^2 \cos^2 \alpha - R^2 \sin^2 \alpha)} \end{cases} \quad (3.116)$$

unde relația pentru L este o relație de calcul, iar cea pentru D una de verificare : D trebuie să rezulte mai mare decât dimensiunea d_{\max} a măsurandului impusă prin tema de proiectare .

Modul de lucru constă din suprapunerea graficelor Δz , L și D ca funcții de R și e/R pentru anumite valori, considerate separat, a lui n, obținându-se valorile R și e/R viabile conform discuției purtate pentru Δz și L, respectiv conform temei de proiectare pentru D.

3.3. Cama optică

3.3.1. Ipoteze de lucru

Se pune problema dezvoltării unei soluții de cap de scanare rotitor care să elimine toate dezavantajele soluțiilor anterioare (cu oglindă plană, respectiv cu oglindă poligonală rotitoare), deci un cap de scanare care să îndeplinească următoarele **deziderate esențiale**:

1. compensarea totală și reciprocă a erorii date de aberația de sfericitate longitudinală a sistemului optic S.O.1 prin eroarea dată de “deplasarea” punctului obiect axial A al sistemului S.O.1. (v. §32.6).

2. obținerea unei viteze constante de scanare a spațiului măsurand: $v=ct.$;

3. obținerea unui grad de acoperire η cât mai aproape de 1.

Capul de scanare rotitor va rezulta în acest caz ca o **camă optică** profilată ca un poligon regulat, cu “n” laturi identice suprafețe riglate (cilindrice) având ca și generatoare o curbă a cărei profil trebuie determinat.

Obținerea profilului curbei dorite se poate aborda fie analitic, fie grafic.

Această soluție reprezintă o realizare complet originală, ea neregăsindu-se nici măcar ca sugestie în literatura de specialitate [B1] privind dispozitivele de scanare.

3.3.2. Determinarea profilului unei fețe a camei optice

A. Metoda analitică:

Fie P un punct al unei fețe a camei (Fig.3.17), caracterizat, față de centrul O de rotație, prin coordonatele (r, θ) , respectiv (u, v) .

Raza laser fixă, situată la distanța e de punctul O și la distanța L de sistemul S.O.1, se reflectă pe camă după unghiul.

$$\varepsilon' = -\varepsilon = \tau \quad (3.117)$$

unde τ = panta tangentei dusă prin P la camă.

Unghiul dintre axa optică S.O.1 și raza reflectată rezultă:

$$\sigma' = 2\tau - \pi/2 \quad (3.118)$$

Un aspect delicat al problemei îl constituie faptul că, la un anumit

moment $t = t_0$, poziția camei este caracterizată de o curbă:

$$(\Gamma_0): \quad r = r(\theta) \quad (3.119)$$

a cărei ecuație dorim să o determinăm, iar la un moment t ulterior, aceeași camă, rotită cu $\Delta\theta$, este caracterizată, în același sistem de coordonate (O, r, θ) , de o curbă:

$$(\Gamma): \quad r^*(\theta) = r(\varphi) \quad (3.120)$$

unde:

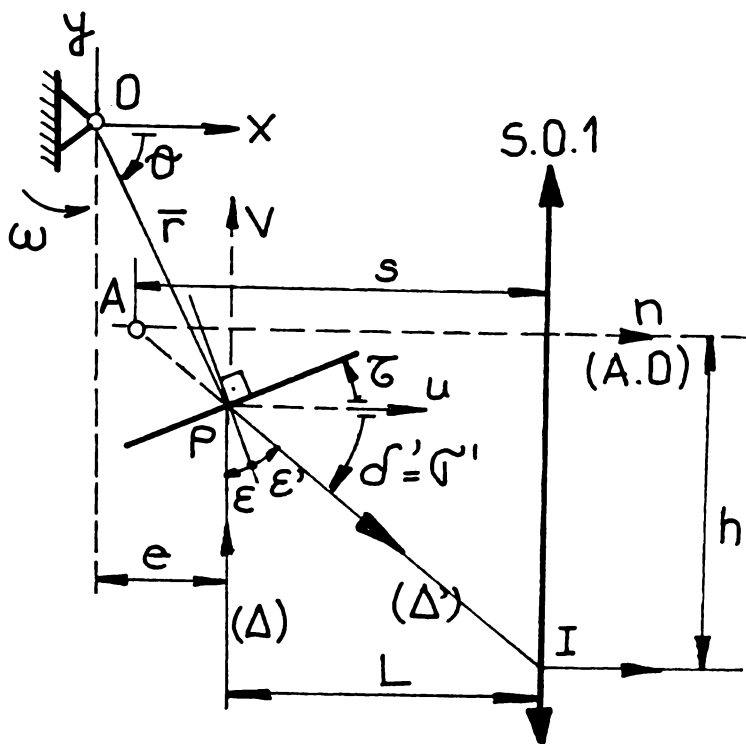


Fig.3.17 Mersul razelor de lumină pentru obținerea profilului camei optice

$$\begin{cases} \varphi = \theta - \Delta\theta, \\ \Delta\theta = \int_{t_1=0}^t \omega(t) \cdot dt \end{cases} \quad (3.121)$$

iar, pentru $\omega = \text{constant}$,

$$\Delta\theta = \omega t \quad (3.122)$$

S-a ales originea timpului momentul $t_1=0$ pentru care începe scanarea unei fețe a cimei poligonale, moment în care raza atinge punctul $Q_1(r_1, \theta_1)$ de început al feței – fig. 3.18.

Cu rel.(3.122) în (3.120), ecuația cimei la momentul t este:

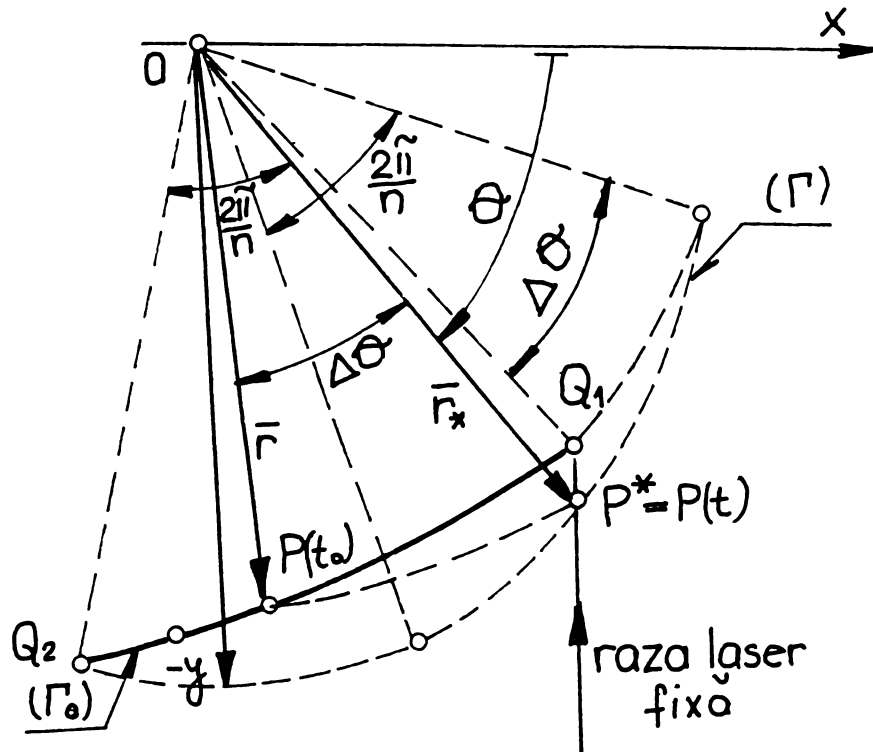


Fig.3.18 Construcția profilului unei fețe a cimei

$$(\Gamma): \quad r^*(\theta) = r(\theta - \omega t) \quad (3.123)$$

Coordonatele punctului P rezultă:

$$\begin{cases} x_p = e = r(\theta - \omega t) \cdot \cos\theta \\ y_p = e \cdot \text{tg}\theta \end{cases} \quad (3.124)$$

relația (3.124)₁ constituind o ecuație în r , θ și t .

Cu rel. (3.124), ținând seama de (3.118) și introducând-o în ecuația dreptei reflectate:

$$(\Delta'): \quad y = y_p + (x - x_p) \text{tg} \sigma \quad (3.125)$$

rezultă ecuația acesteia:

$$(\Delta'): \quad y = e \text{tg}\theta - (x - e) \text{ctg} 2\tau \quad (3.126)$$

unde:

$$\text{tg}\tau = \frac{r^*(\theta)}{\frac{dr^*}{d\theta^*}(\theta)} \quad (3.127)$$

adică, introducând rel. (3.123),

$$\text{tg}\tau = \frac{r(\varphi)}{\frac{dr}{d\varphi}} \quad (3.128)$$

relație ce poate fi scrisă și în funcție de θ (este valabilă și la $t=0$).

Notație: Fie punctul $M: = P(\tau = \pi/4) = A(\tau = \pi/4)$. Pentru acest punct $\text{tg}\tau = 1$, așadar:

$$r(\theta_M - \omega t_M) = \frac{d}{d\theta} [r(\theta - \omega t_M)]_{\theta=\theta_M} \quad (3.129)$$

relație între θ_M și t_M din care, impunându-se una din mărimi și cunoscând funcția $r(\theta)$, rezultă cealaltă mărime.

Funcția de scanare $h(\theta)$ se obține ca o diferență de coordonate:

$$h = v_I = y_I - y_M \quad (3.130)$$

Punctul I de intersecție al razei reflectate cu sistemul S.O.1 are coordonatele din rel.(3.126):

$$\begin{cases} x_I = e + L \\ y_I = e \operatorname{tg} \theta - L \cdot \operatorname{ctg} 2\tau \end{cases} \quad (3.131)$$

Cu rel. (3.131) în (3.130), rezultă:

$$h = e (\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \theta_M) - L \operatorname{ctg} 2\tau \quad (3.132)$$

Poziția punctului obiect $\{A\} = \Delta \cap A.O.$ (punctul de pe axa optică din care este ca și cum ar porni raza obiect Δ) este dată de distanța L , respectiv de abcisa:

$$u_A = s - L = x_A - e \quad (3.133)$$

Ecuția axei optice se obține din rel. (3.134), ținând seama că $\Delta = A.O.$ pentru $P = M$ ($\tau = \pi/4$):

$$(A.O.) : y = e \operatorname{tg} \theta_M = y_M \quad (3.134)$$

Din rel. (3.126) și (3.134), ținându-se seama de modul de definire a lui A și de rel. (3.133), rezultă:

$$u_A = e (\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \theta_M) \cdot \operatorname{tg} 2\tau \quad (3.135)$$

așadar, cu (3.133):

$$s = L - e (\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \theta_M) \cdot \operatorname{tg} 2\tau \quad (3.136)$$

sau ținând seama de (3.132):

$$s = + h(\theta) \cdot \operatorname{tg} 2\tau \quad (3.137)$$

Determinarea funcției $\alpha(\theta)$ se poate face atunci din condiția ca eroarea dată de "migrarea" punctului obiect A să se compenseze cu eroarea care ar fi dată de aberația de sfericitate longitudinală a sistemului S.O.1:

$$s(h) = \bar{f}(h) \quad (3.138)$$

Din această condiție, cu rel. (3.132) și (3.137) rezultă sistemul:

$$\begin{cases} \bar{f}(h(\theta)) = +h(\theta) \cdot \operatorname{tg} 2\tau \\ h(\theta) = e(\operatorname{tg} \theta - \operatorname{tg} \theta_M) - L \operatorname{ctg} 2\tau \end{cases} \quad (3.139)$$

de unde rezultă funcția $\tau = \tau(\theta)$ și înlocuind în ecuația diferențială (3.128), rezultă funcția căutată $r = r(\varphi)$, sau considerând pentru simplitate $\Delta\theta=0$ (la $t=0$), profilul căutat $r = r(\theta)$ a unei fețe a camei.

$$\text{Într-adevăr, cum: } L = -\bar{f}_0; \quad ds_h = \bar{f} - \bar{f}_0 \quad (3.140)$$

rezultă, din (3.139):

$$L + h \operatorname{tg} 2\tau = ds_h \quad (3.141)$$

unde ds_h =aberația de sfericitate longitudinală obiect a S.O.

Ținând seama de (3.139):

$$h = e \operatorname{tg} \theta - y_M - L \operatorname{ctg} 2\tau \quad (3.142)$$

din (3.141) și (3.142) rezultă ecuația $\tau(\theta)$ căutată:

$$(e \operatorname{tg} \theta - y_M) \operatorname{tg} 2\tau = ds_h \quad (3.143)$$

ținând seama de dependența lui ds_h de h și a lui h de θ și de τ -rel. (3.142).

Rezultă $\text{ctg}2\tau(\theta)$ și se ține seama de:

$$\text{tg}2\tau = \frac{2\text{tg}\tau}{1 + \text{tg}^2\tau} \quad (3.144)$$

ceea ce dă: $\text{tg}\tau = \text{ctg}2\tau - \sqrt{\text{ctg}^2 2\tau - 1}$ (3.145)

Din rel. (3.128), rezultă atunci:

$$r = \text{tg}\tau \cdot \frac{dr}{d\theta} \quad (3.146)$$

de unde: $\int_{\theta_1}^{\theta} \text{ctg}\tau \cdot d\theta = \int_{r_1}^r \frac{dr}{r}$ (3.147)

adică: $r = r_1 \exp \int_{\theta_1}^{\theta} \text{ctg}\tau \cdot d\theta$ (3.148)

Ținând seama și de (3.145) în (3.138), rezultă ecuația $r = r(\theta)$ căutată:

$$r = r_1 \exp \int_{\theta_1}^{\theta} \frac{d\theta}{\text{ctg}2\tau - \sqrt{\text{ctg}^2 2\tau - 1}} \quad (3.149)$$

Exemplu: Pentru un S.O. de tip lentilă simplă,

$$ds_h = ch^2 + dh^4; \quad c, d = \text{ct}. \quad (3.150)$$

sau, pentru simplitate, se va considera:

$$ds_h = ch^2; \quad c = \text{ct}. \quad (3.151)$$

Notăție: $\tau_1 = \text{ctg} 2\tau$

Rezultă, din (3.143) și (3.151), cu (3.142):

$$(\text{etg}\theta - y_M)\tau_1^{-1} = c[(\text{etg}\theta - y_M) - L\tau_1]^P \quad (3.153)$$

sau, efectuînd calculele, se obține ecuația de gr. III în τ :

$$CL^2\tau_1^3 - 2CL(\text{etg}\theta - y_M)\tau_1^2 + C(\text{etg}\theta - y_M)\tau_1 - (\text{etg}\theta - y_M) = 0 \quad (3.154)$$

de unde rezultă $\tau_1 = \tau_1(\theta)$, deci, din (3.149), ecuația generatoarei profilului unei fețe:

$$r(\theta) = r_1 \exp \int_{\theta_1}^{\theta} \frac{d\theta}{\tau_1 - \sqrt{\tau_1^2 - 1}} \quad (3.155)$$

B. Metoda grafică

După cum s-a putut observa, metoda analitică de determinare a funcției r ce dă profilul uneia din cele n fețe curbe identice ale camei este destul de dificilă. De aceea, în cele ce urmează se va dezvolta metoda grafică, de departe mai ușor de aplicat și mai convenabilă.

În realizarea profilului uneia din fețele camei prin această metodă, se va porni de la necesitatea satisfacerii celor trei **deziderate** expuse în §3.3.1.

Tema de proiectare impune, de exemplu:

D =diametrul sistemului optic S.O.1 în plan meridian, ca dimensiune maximă a măsurandului (domeniu de măsurare);

f_s =frecvența de scanare [nr. scanări/ unitatea de timp]

Notînd cu T intervalul de timp necesar pentru o scanare (o parcurgere S.O.1, deci o parcurgere a unei fețe a oglinzii), rezultă relația evidentă:

$$f_s = \frac{1}{T} = nf \quad (3.156)$$

unde f = frecvența de rotație a oglinzii.

Cum există un ω_{\max} = turația maximă admisibilă (din considerente tehnologice și funcționale) pentru capul de scanare, se poate evalua atunci numărul necesar de fețe al oglinzii:

$$n \geq \frac{2\pi f_s}{\omega_{\max}} \quad (3.157)$$

Etapele de lucru (calcul și construcție grafică):

1°. se împarte diametrul D al S.O.1 în $2m$ segmente egale, considerându-se pentru aceasta $2m + 1$ puncte echidistante pe sistemul S.O.1 (considerat redus la o lentilă subțire, convergentă). Fie acest sistem de puncte I_j , $j = 1, 2m + 1$ (v. Fig. 3.19). Realizarea construcției se redă în figura 3.19, pentru $n=6 \Rightarrow \alpha=60^\circ$ și $m=8$ puncte de precizie; vezi de asemenea exemple de construcție din fig. 3.28.

Discuție: Punctul I_1 se consideră atins la $t_1 = 0$ (originea timpului). Punctul P_1 de reflexie la $t_1 = 0$ trebuie să fie chiar începutul feței considerate a camei, iar punctul P_{2m+1} la $t_{2m+1} = T$ (timpul de scanare a unei fețe a camei = timpul de scanare a lui S.O.1, respectiv a spațiului măsurand) fie chiar sfârșitul (ultimul punct al) feței considerate a camei, aceasta fiind chiar materializarea condiției gradului de acoperire η unitar.

I_1 fiind atins la $t_1 = 0$, I_j este atins la momentul $t_j = j \cdot \Delta t$, unde:

$$\Delta t = T / 2m \quad (3.158)$$

Timpul de scanare T a unei fețe este:

$$T = \frac{f}{n} = \frac{2\pi}{\omega n} \quad (3.159)$$

unde ω = viteza unghiulară efectivă a oglinzii [rad/s].

Rezultă:

$$\Delta t = \frac{\pi}{\omega \cdot m \cdot n} \quad (3.160)$$

iar cum distanța Δh = incrementul spațial este:

$$\Delta h = I_j I_{j+1} = v \cdot \Delta t = D / 2m \quad (3.161)$$

se obține, din rel. (3.159) și (3.160) relația evidentă de legătură:

$$\frac{2\pi}{n} \cdot v = D \cdot \omega \quad (3.162)$$

Alegând n = numărul. de laturi a oglinzii, respectînd (3.157) rezultă, din rel. (3.156), intervalul de timp necesar scanării unei fețe a camei:

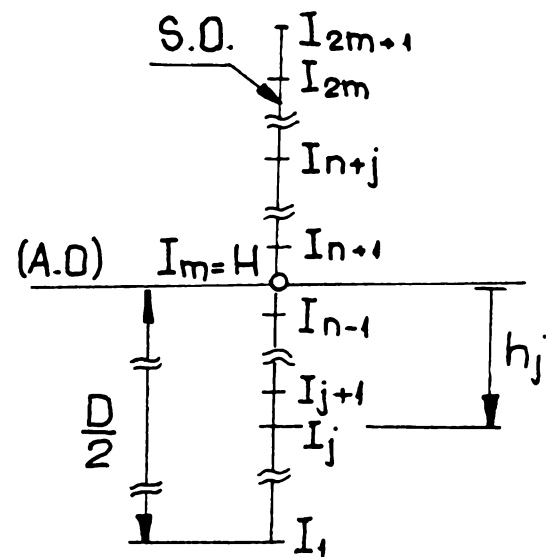


Fig. 3.19 Împărțirea S.O. (considerat lentilă subțire) în segmente egale

$$T = \frac{1}{f_s} \quad (3.163)$$

Rezultă incrementul temporal Δt cu rel. (3.160), iar din rel. (3.161) rezultă viteza de scanare:

$$v = \frac{D}{2m \cdot \Delta t} \quad (3.164)$$

2°. Se alege un sistem optic S.O.1 cu distanța focală obiect (în paraxial) aleasă din condiția de gabarit a sistemului. Se calculează aberația de deschidere longitudinală a S.O.1 și se poziționează punctele $\bar{F}(h)$ obținute pe axa optică. Se poziționează raza laser fixă convenabil între S.O.1 și $F(h_{\max})$, mai aproape de acesta, rezultând astfel L.

3°. Se alege în mod convenabil poziția punctului O, așadar parametrii $e = x_M$ și θ_M , unde se ține seama că:

$$e \operatorname{tg} \theta_M = y_M \quad (3.165)$$

4°. Se impune condiția ca punctul $A_j = A(t_j)$ să coincidă cu focarul $\bar{F}(h_j = D - j \cdot \Delta h)$. Astfel, se impune inițial $A_1 = \bar{F}\left(h_{\max} = \frac{D}{2}\right) = \bar{F}\left(h_{\min} = -\frac{D}{2}\right)$, deoarece curba aberației de sfericitate longitudinală este simetrică în raport cu h.

Se unesc punctele A_1 și I_1 și rezultă dreapta $\Delta'_1 = \Delta'(t_1 = 0)$. Rezultă $\{P_1\} = \Delta'_1 \cap \Delta$ ca punctul de început al feței camei, precum și vectorul de poziție $\bar{r}_1 = \overline{OP_1}$.

5°. Se unesc punctele $A_2 = \bar{F}\left(h_2 = \frac{D}{2} - \Delta h\right)$ și I_2 și rezultă punctul $\{P_2^*\} = \Delta'_2 \cap \Delta$, unde $\Delta'_2 = \Delta'(t_2 = \Delta t)$. Rezultă raza vectoare $\bar{r}_2^* = \overline{OP_2^*}$. Rabătând \bar{r}_2^* cu incrementul unghiular:

$$\Delta \theta = \omega \cdot \Delta t = \alpha / 2m \quad (3.166)$$

în sens opus lui $\bar{\omega}$, se obține raza \bar{r}_2 , respectiv punctul P_2 .

6°. Se procedează analog pentru fiecare punct A_j . A_j se unește cu I_j și rezultă $\{P_j^*\} = \Delta_j^1 \cap \Delta$ și $\bar{r}_j^* = \overline{OP_j^*}$. Se rabate \bar{r}_j^* cu unghiul $j \cdot \Delta \theta$ în sens opus lui $\bar{\omega}$ și rezultă \bar{r}_j , respectiv punctul P_j .

7°. Se obține astfel, prin punctele P_j , $j = \overline{1, 2m+1}$, profilul unei fețe a camei poligonale (Fig.3.20).

3.3.3. Aplicație

Se va considera în continuare un exemplu de construcție a profilului camei pentru un sistem optic S.O.1 refractant de tip lentilă simplă.

Pentru următoarele date caracteristice:

$$r_1 = \infty; r_2 = -51,4 \text{ mm}; n_1 = n_3 = 1; n_2 = 1,513895,$$

care dau o distanță focală obiect $\bar{f} = 100,0204 \text{ mm} = L$, construcția unei fețe a camei optice este redată în figura 3.28.

Făcând o rotație de $n=9$ ori a profilului obținut al feței, rezultă profilul întregii came.

Trebuie subliniat faptul că metoda grafică este susceptibilă la o realizare computerizată, automată, pentru obținerea profitului dorit.

3.3.4. Segmentul Q_2Q_1

Se pune problema ca segmentul de racord dintre capătul unei fețe a camei (punctul Q_2) și începutul feței următoare a camei (punctul Q_1) să permită ajungerea

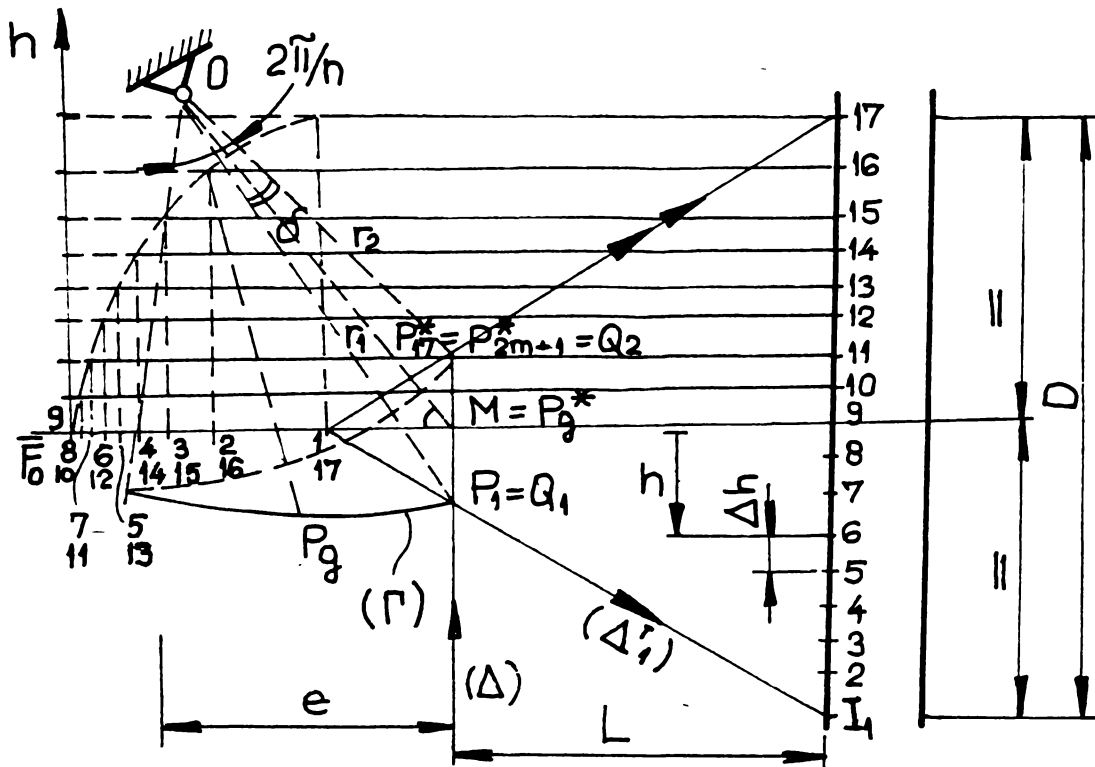


Fig.3.20 Profilul unei fețe a camei optice

razei laser pînă în punctul Q_2 , așadar să se realizeze parcurgerea completă a fiecărei fețe Q_1Q_2 .

Geometric, această condiție s-ar transpune prin situația din figura 3.21.a sau, la limită, cu cea din figura 3.21.b, în care raza laser fixă practic coincide cu fațeta Q_2Q_1 .

Se observă însă din construcția din figura 3.20, că situația din figura 3.21.b este cea care este permanent satisfăcută prin însăși realizarea construcției: astfel, $\angle P_1OP_2^* = \angle P_1'OP_2$ și este chiar δ , unde, din ΔQ_1Q_2O prin teorema cosinusului:

$$\cos \delta = \frac{r_1^2 + r_2^2 - q^2}{2r_1r_2} \quad (3.167)$$

unde s-a notat $q = Q_1Q_2$.

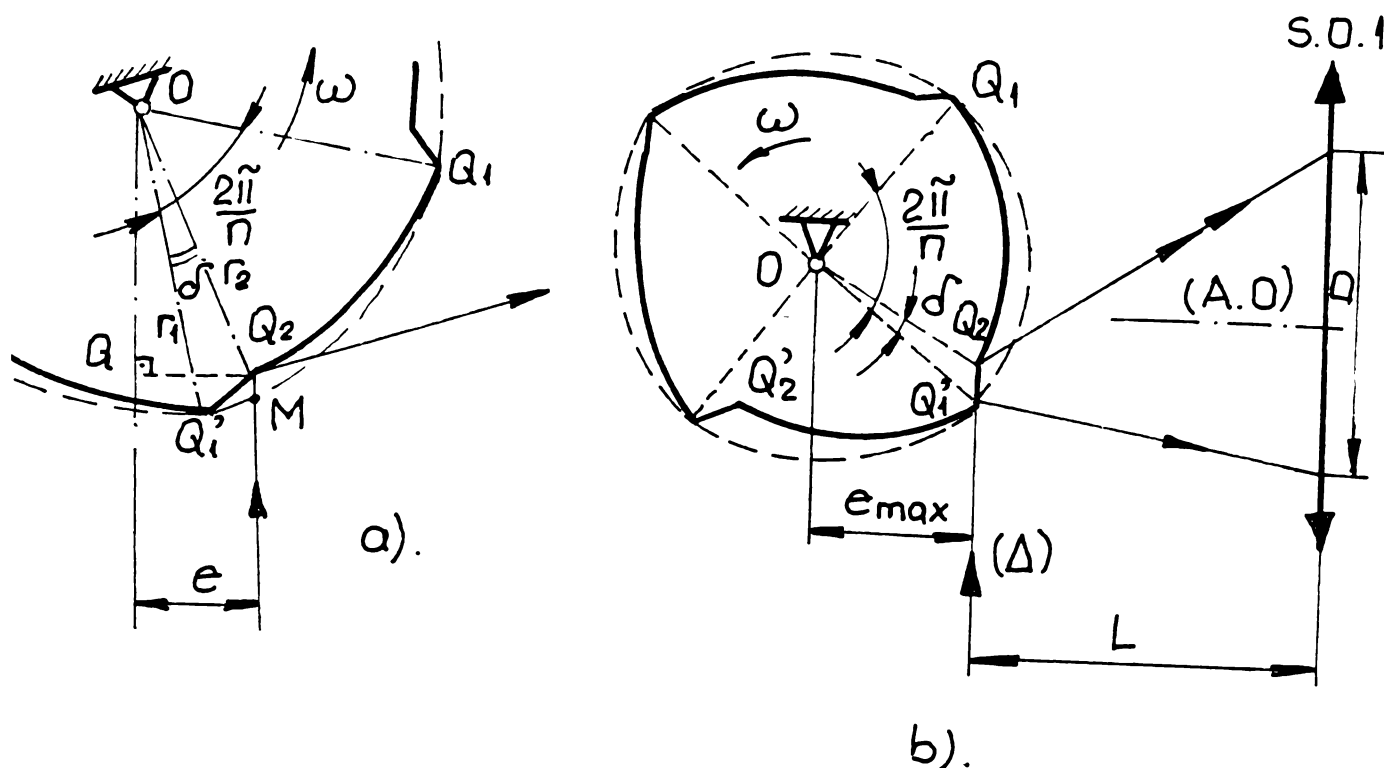
Se mai poate scrie din figura 3.20:

$$\begin{cases} r_2^2 = e^2 + \left(y_M + \frac{q}{2}\right)^2 \\ r_1^2 = e^2 + \left(y_M - \frac{q}{2}\right)^2 \end{cases} \quad (3.168)$$

unde y_M (poziția lui O) s-a ales, la felca și L și e. Având în vedere că $A_1A_{2m+1} = D =$ dimensiunea spațiului scanat, rezultă:

$$\frac{q/2}{D/2} = \frac{f(h_{\max}) - L}{f(h_{\max})} \quad (3.169)$$

unde $f(h_{\max}) = f(D/2) = d(S.O.1, A_1) = z_1$

Fig.3.21 Cama optică: segmentul terminal Q_2Q_1 al unei fețe

Așadar
$$q = D \left(1 - \frac{L}{f_1} \right) \quad (3.170)$$

de unde, făcînd înlocuirile, din rel. (3.169) se obține:

$$\cos \delta = \frac{r_M^2 - q^2/4}{\sqrt{[e^2 + (y_M + q/2)^2][e^2 + (y_M - q/2)^2]}} \quad (3.171)$$

unde s-a notat cu $r_M = \sqrt{e^2 + y_M^2}$ poziția lui M față de O.

O altă expresie pentru δ se mai poate obține scriind teorema sinusurilor în ΔQ_1OM , respectiv în ΔQ_2OM . Rezultă:

$$\begin{cases} \frac{\sin \angle Q_1OM}{q/2} = \frac{\sin(\angle F_0MO + \pi/2)}{r_1} \\ \frac{\sin \angle Q_2OM}{q/2} = \frac{\sin(\pi/2 - \angle F_0MO)}{r_2} \end{cases} \quad (3.172)$$

așadar:
$$\delta = \angle Q_1OM + \angle Q_2OM = \arcsin \frac{q}{2r_1} \cdot \frac{y_M}{r_M} + \arcsin \frac{q}{2r_2} \cdot \frac{e}{r_M} \quad (3.173)$$

Concluzie: Se observă că în cazul camei optice, $\eta = 1$, așa cum ne-am propus: imediat după ce se ajunge în punctul Q_2 , raza laser "sare" practic în Q_1 , punctul de început al feței următoare.

3.3.5. Aproximarea profilului real

Considerând profilul real al camei construit punct cu punct conform metodologiei de la 3.3.2. (v. exemplul din §3.3.3), se poate considera o aproximare: a) circulară; b) liniară a acestuia pentru a ușura tehnologia de execuție.

O altă modalitate de abordare a acestei probleme, impunând tipul de profil al camei și alegînd din aceasta S.O., va fi tratată în §3.3.6.

Tipuri de aproximare:

a) profil circular excentric (fig. 3.22):

metoda1: Construcție: Se consideră tangentele τ_1 , respectiv τ_2 la profilul real Γ , respectiv normalele n_1 , n_2 la Γ , în punctul Q_1 , respectiv Q_2 . Punctul C care constituie centrul arcului de cerc de rază ρ ce aproximează porțiunea dată a lui Γ se va obține la intersecția normalelor: $\{C\} = n_1 \cap n_2$

metoda2: Punctul C se consideră pe mediatoarea segmentului $|Q_1Q_2|$ în punctul în care unghiurile $\angle(Q_1, \tau_1)$ și $\angle(Q_2, \tau_2)$ sunt cât mai apropiate de $\pi/2$. Practic, aceasta se poate realiza trasând n_1 și n_2 și considerând $C \in |C_1C_2|$, unde C_1 , respectiv C_2 sunt punctele de intersecție a lui n_1 , respectiv n_2 , cu mediatoarea lui $|Q_1Q_2|$.

Observații: 1. Se observă că, pentru metoda 1, perpendiculara din C pe $|Q_1Q_2|$ nu este neapărat mediatoarea segmentului, iar pentru metoda 2, CP_1 și CP_2 nu sunt neapărat normalele n_1 și n_2 , la Γ în respectiv Q_1 și Q_2 .

2. Din modul de realizare se observă că metoda 2 oferă un plus de rigoare, de aceea este de preferat.

3. Cercul $C(O, \rho_c)$, unde $\rho_c = \|OC\|$ va primi denumirea de **cercul centrelor aparente** și conține cele n puncte C corespunzătoare celor n fețe ale multicamei.

Se pot evalua: grafic, numeric sau analitic (dacă se dispune de ecuația lui Γ):

I. abaterile de la profilul real:

$$\begin{cases} - \text{abaterea absolută} : \Delta r(\theta) = r_s(\theta) - r(\theta) \\ - \text{abaterea relativă} : \delta_r = \frac{\Delta r}{r} \cdot 100 [\%] \end{cases} \quad (3.174)$$

II. erorile produse (astfel) în procesul de scanare prin înlocuirea profilului Γ cu cel aproximativ:

$$\Delta h(\theta) = h_a - h \quad (3.175)$$

b) **profilul liniar** (fig.3.23): se poate considera una din variantele din figura 3.23.a, b -profilele trasate punctat.

Concluzie: Se observă că, de fapt, oglinda poligonală cu fețe plane este o aproximare a variantei exacte, dată de tronsonul de curbă Γ și de segmentul subîntins de unghiul δ . S-a regăsit astfel, ca un **caz particular al camei optice**, varianta oglinzii poligonale, tratată în §3.2.

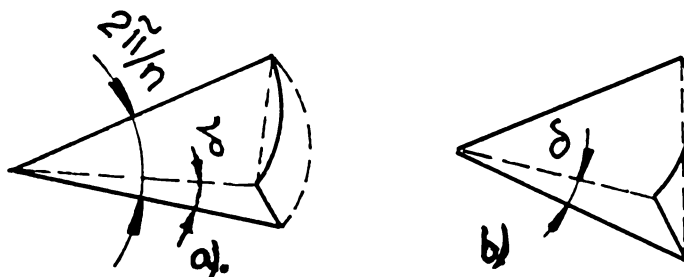


Fig.3.23 Aproximarea profilului camei cu un profil liniar

3.3.6. Determinarea unui profil impus al camei

a) Punerea problemei

Se poate pune și problema inversă celei din §3.3.2 și anume a impune anumite tipuri de profile $r = r(\theta)$ și a vedea care sunt acele S.O. adecvate acestora, astfel încât să fie satisfăcute cerințele temei de proiectare.

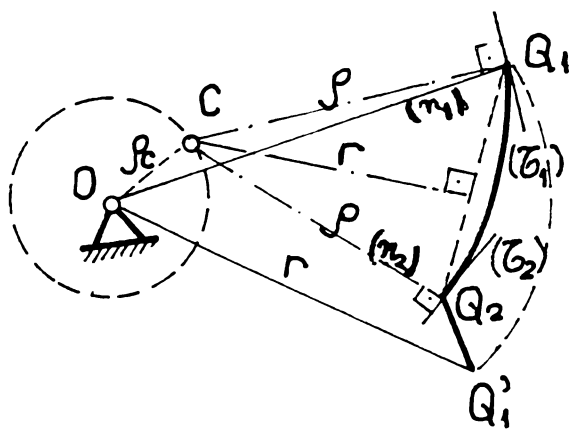


Fig.3.22 Aproximarea profilului camei cu un profil circular excentric

Traiectul de rezolvare pornește în acest caz de la rel. (3.128): dispunând de $r(\theta)$, rezultă $\operatorname{tg}\alpha$, apoi, cu (3.144), $\operatorname{tg} 2\alpha$.

Din rel. (3.143), rezultă expresia lui ds_h , iar din rel. (3.142), expresia lui $h(\theta)$

Se obține dependența $\theta(h)$ și apoi, cu (3.143), dependența $d s_h(h)$.

În continuare vor fi considerate câteva cazuri particulare convenabile.

b) Spirala arhimedică

Se consideră spirala arhimedică: $r = a\theta$; $a = \text{ct.}$

Avantaj: generare cinematică ușor de realizat (punct de pe o culisă care se deplasează în translație cu viteză constantă pe o dreaptă (bară) care se rotește uniform).
Din (3.128):

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{r}{dr/d\theta} = \theta \Rightarrow \operatorname{tg}2\alpha = \frac{2\theta}{1+\theta^2} \quad (3.176)$$

$$\text{de unde: } \begin{cases} ds_h = \frac{2\theta(\operatorname{ctg}\theta - y_M)}{1+\theta^2} \\ h(\theta) = \operatorname{ctg}\theta - y_M - \frac{2L\theta}{1+\theta^2} \end{cases} \quad (3.177)$$

Rezultă ds_h funcție de h și problema se reduce la a căuta acel S.O. care are această aberație de sfericitate longitudinală.

c) Spirala logaritmică

$$\text{Ecuație: } r(\theta) = a e^{b\theta}, \quad a, b = \text{ct.} \quad (3.178)$$

$$\text{Panta tangentei: } \operatorname{tg}\alpha = \frac{r(\theta)}{dr/d\theta} = \frac{1}{b} \quad (3.179)$$

Din ecuația (3.129):

$$r(\theta_M - \omega t_M) = \frac{d}{d\theta} [r(\theta - \omega t_M)]$$

rezultă:

$$b = 1 \Rightarrow \alpha = \pi/4 \Rightarrow r = a e^\theta \quad (3.180)$$

Datorită sensului obișnuit considerat al razelor de lumină, de la stânga la dreapta, este convenabil însă de a considera spirala logaritmică oglindită (levogiră).

$$(\Gamma): r(\theta) = a e^{-\theta}; \quad a = \text{ct.} \quad (3.181)$$

Important: Deoarece $\alpha = \pi/4$, se observă (Fig.3.24) că raza Δ' reflectată de oglinda camă este în permanență orizontală, așadar s-a obținut un profil al oglinzii rotitoare pentru care nu mai este nevoie de sistem optic refractant pentru a asigura condiția scanării paralele cu o direcție dată a spațiului măsurand.

Notație: Fie în acest caz χ =ordonata dreptei reflectate și E =excentricitatea razei fixe (Δ) , notată anterior cu e . Se va folosi doar aici această notație pentru a nu o

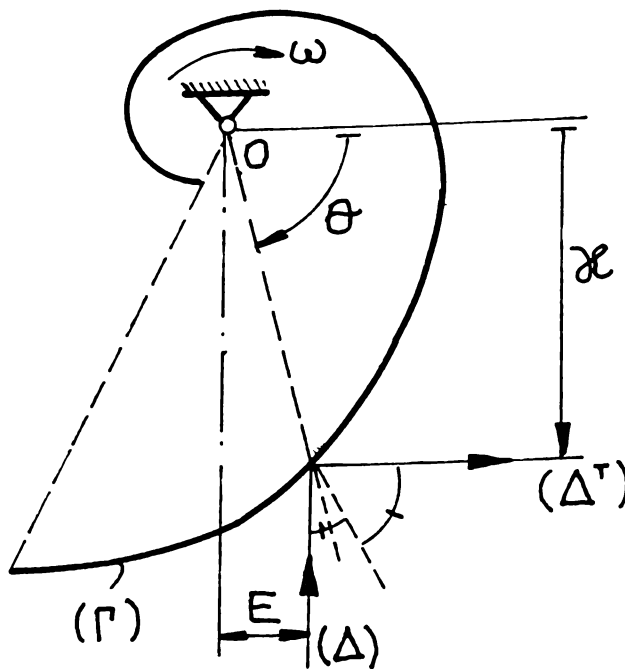


Fig.3.24 Uricama optică

confunda cu numărul e , baza logaritmilor natu-rali. Din rel. (3.132), cum $\alpha = \pi/4$, rezultă:

$$\chi = h(\theta) + y_M = E \cdot \operatorname{tg}\theta \quad (3.182)$$

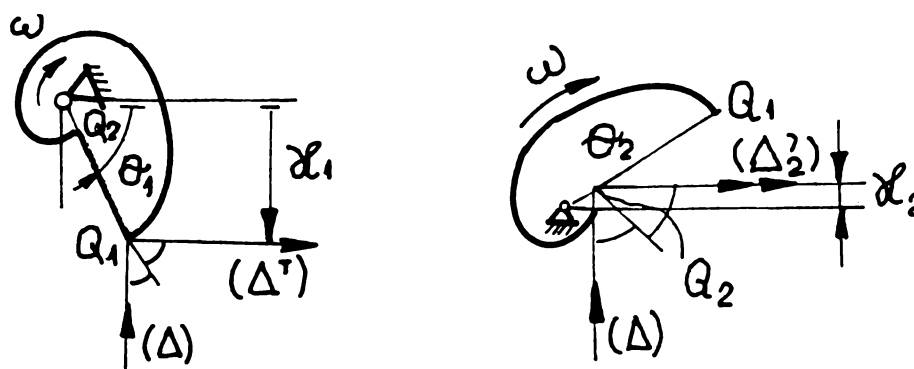


Fig.3.25 Două poziții (extreme) ale unicei optice

Realizând oglinda ca o singură curbă (Fig.3.25), domeniul de măsurare rezultă atunci:

$$\operatorname{Dom} \chi = \chi_2 - \chi_1 \quad (3.183)$$

unde χ_1, χ_2 sunt abscisele pozițiilor extreme, Δ'_1 și Δ'_2 , ale razei reflectate (Fig.3.25.a, b).

Notînd:
$$\begin{cases} r_1 = OQ_1 = ae^{2\pi} \\ r_2 = OQ_2 = a \end{cases} \quad (3.184)$$

din figura 3.25.a, b, rezultă:
$$\begin{cases} \operatorname{tg}\theta_1 = -\sqrt{r_1^2 - E^2} / E \\ \operatorname{tg}\theta_2 = \sqrt{r_2^2 - E^2} / E \end{cases} \quad (3.185)$$

Cum $\chi_1 = r_1 \operatorname{tg} \theta_1$; $\chi_2 = r_2 \operatorname{tg} \theta_2$ (3.186)
făcînd succesiv înlocuirile în (3.183), rezultă:

$$\begin{cases} \chi_1 = -\sqrt{a^2 e^{4\pi} - E^2}; \quad \chi_2 = \sqrt{a^2 - E^2} \\ \operatorname{Dom}\chi = \sqrt{a^2 - E^2} + \sqrt{a^2 e^{4\pi} - E^2} \end{cases} \quad (3.187)$$

Variantele de acționare ale dispozitivelor de scanare cu unică optică profilată după o spirală logaritmică

1) cu motor rotativ uni-sens

În acest caz, unghiul activ (utilizat pentru scanare pe o rotație) este, din figura 3.25a,b:

$$\angle \text{activ} = 2\pi - (\theta_2 - \theta_1) \quad (3.188)$$

Rezultă gradul de acoperire:
$$\eta = \frac{\angle \text{activ}}{2\pi} = 1 - \frac{\theta_2 - \theta_1}{2\pi} \quad (3.189)$$

Problema care se pune este faptul că $\operatorname{Dom} \chi$ crește odată cu creșterea lui $|\theta_1|, \theta_2$, iar, invers, η crește odată cu scăderea lui $|\theta_1|, \theta_2$. Cele două cerințe, creșterea lui χ și creșterea lui η , ambele necesare, fiind contradictorii, trebuie realizată o contrabalansare a lor. Se satisface unul din ele, de exemplu valoarea impusă alui $\operatorname{Dom} \chi$, η fiind realizat totuși la valori acceptabile, frecvența de scanare f_s fiind adusă la

parametrii impuși de tema de proiectare prin mărirea vitezei de rotație ω ca alternativă se realizează a doua variantă de acționare:

2) **cu motor pas-cu-pas:** se realizează o acționare alternativă, în punctele Q_1 și Q_2 cama schimbând sensul. În acest caz se poate mări $|\chi_1|, \chi_2$, așadar și Dom χ rezultă convenabil (v. și condițiile de gabarit), gradul de acoperire η fiind mult mai aproape de valoarea unitară.

Într-adevăr, sunt necesare (după atingerea punctului P_1 , respectiv a lui P_2) porțiuni unghiulare (și perioade) de decelerare, respectiv de accelerare, ciclul vitezei avînd deci alura din figura 3.26.

În punctele de pe graficul $\omega(t)$ marcate cu 1, respectiv cu 2, punctul P (de reflexie a razei Δ) se găsește în P_1 , respectiv P_2 .

Perioada τ corespunde decelerării, respectiv accelerării necesare. Evident, aceasta trebuie să fie cât mai scurtă posibilă și fără șocuri mecanice, pe cât posibil, motiv pentru care este convenabilă alegerea unei "funcții de racord" de tip sinusoidal (v. și Cap.4).

Timpul activ t_a este cel corespunzător parcurgerii porțiunii P_1P_2 , respectiv P_2P_1 în sens invers, așadar:

$$t_a = \frac{2\pi - (\theta_2 - \theta_1)}{\omega} \quad (3.190)$$

Gradul de acoperire rezultă în acest caz: $\eta = 2t_a / T = 1 - 4\tau / T$ (3.191) și se observă că poate fi adus mai aproape de valoarea unitară decât în primul caz.

Aplicație: 1) **Trasarea profilului unicamei optice cu profil de spirală logaritmică**

În fig.8.15 este prezentat profilul unicamei optice, trasat prin puncte, cu un increment unghiular $\Delta\theta = 2^\circ$.

Curba realizată a fost considerată, conform discuției de mai sus, o spirală logaritmică. În forma generală a ecuației sale – rel. (3.178) – s-a considerat raza inițială (la $\theta = 0$) $r_0 = a = 20$ mm, iar indicele $b = 1/2\pi$.

Ecuația profilului camei este așadar:

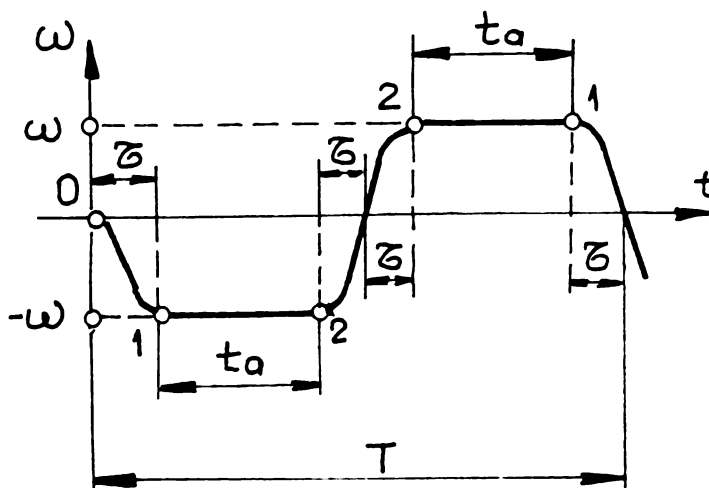


Fig.3.26 Cicul cinematic al unicamei la acționarea cu motor pas-cu-pas

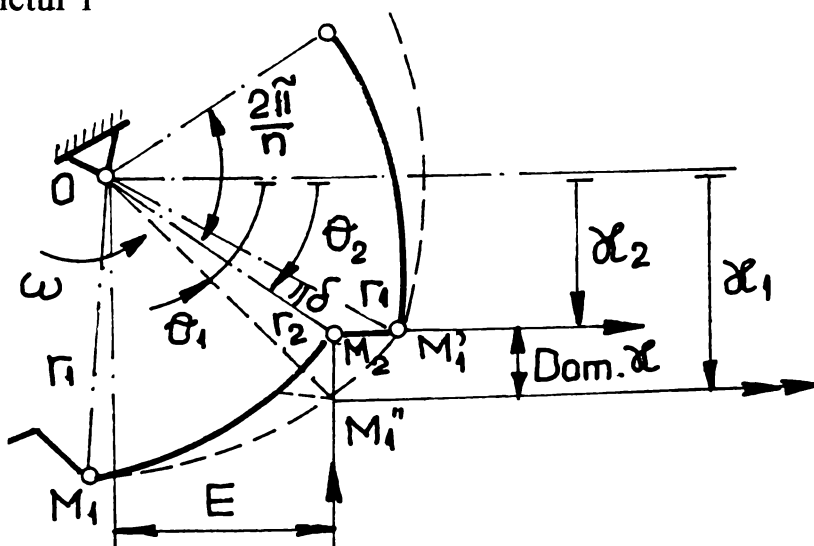


Fig.3.27 Multicama optică cu profil de spirală poligonală

$$r = r_0 e^{\theta/2\pi} \quad (3.192)$$

2) Pentru varianta dată de ec. (3.181) se observă că valoarea lui r_1 rezultă prea mare – rel. (3.184) – ceea ce face acea variantă, teoretic optimă, inutilizabilă. Această variantă se poate utiliza doar considerând profilul realizat nu pentru $\theta=2\pi$, ci pe o porțiune $\Delta\theta$ convenabil aleasă astfel încât variația razei să nu fie prea mare și cama să fie realizabilă. Se regăsește în acest caz o situație particulară a **multicamei optice care nu mai necesită sistem optic refractant** (fig.3.27), ceea ce constituie o soluție extrem de favorabilă.

Pentru a realiza uni-cama, este necesară considerarea unei valori subunitare a lui b – v. ec. (3.192) – pentru ca piesa să fie realizabilă.

În acest caz însă soluția se complică (v. §8.3), fiind necesare optimizări ulterioare.

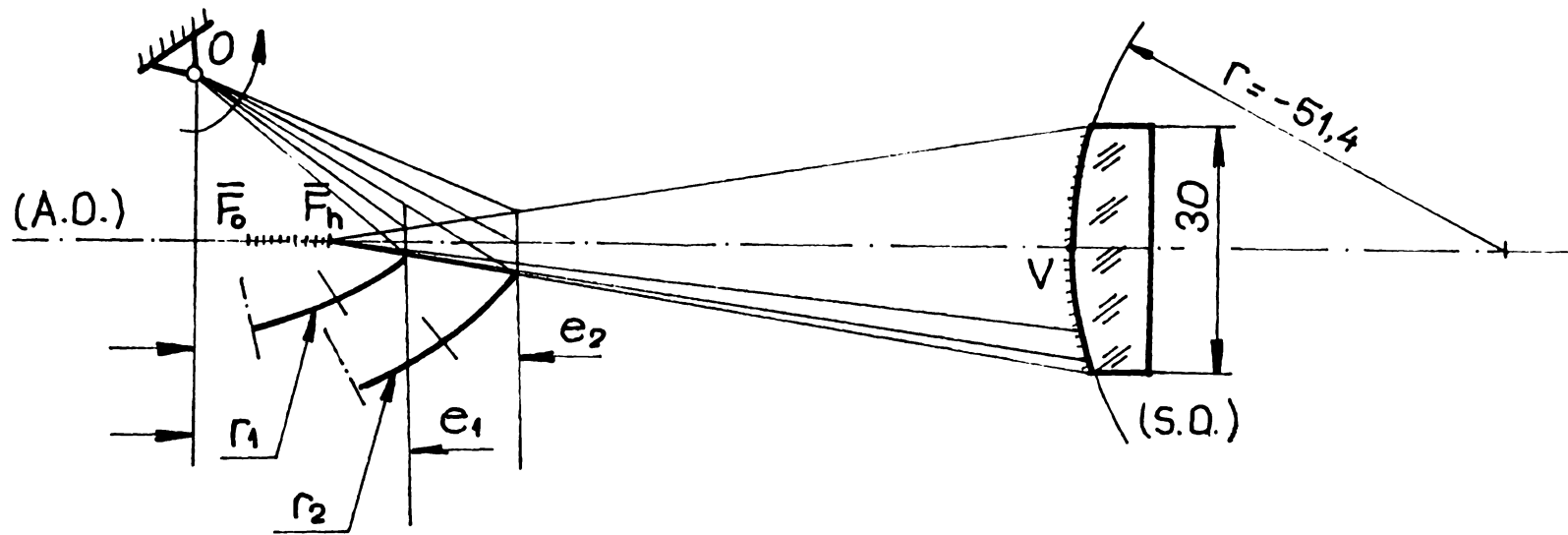


Fig.3.28 Realizarea profilului unei fețe a camei optice pentru două valori ale excentricității “e”

Capitolul 4

DISPOZITIVE DE SCANARE CU ELEMENTE ÎN MIȘCARE DE OSCILAȚIE

4.1. Discuție preliminară. Justificarea alegerii soluției capului de scanare oscilant

În capitolul precedent s-a discutat pe larg realizarea dispozitivului de scanare laser având capul de scanare un element în mișcare de rotație: oglindă plană sau poligonală cu fețe drepte sau curbe.

S-au putut observa din discuție atât avantajele cât și dezavantajele fiecărei soluții. Există astfel mai multe probleme a căror analiză conduce la dezvoltarea unor alte soluții de cap de scanare, preferabilă din anumite puncte de vedere. Se pot aminti astfel următoarele aspecte:

1. Capul de scanare cu oglindă plană rotitoare corespunde din punct de vedere al simplității constructive și a respectării condiției de paralelism a razei ce scanează spațiul măsurând cu axa optică (A.O.), aceasta din urmă însă numai utilizând sisteme optice S.O.1 relativ complicate, foarte bine corectate la aberația de sfericitate. Deja este o problemă constructivă și economică căreia i se adaugă faptul absolut necorespunzător al unui grad de acoperire η extrem de redus, ceea ce face soluția în general neconvenabilă.

2. Capul de scanare cu oglindă poligonală cu fețe drepte are, spre deosebire de situația anterioară, un η bun, chiar cvasiunitar și , respectând rigorile mersului de proiectare (**traiect totuși destul de complicat**), se poate ajunge la compensarea reciprocă, cel puțin parțială, a celor două surse principale de erori, să le spunem de tip constructiv. Soluția poate așadar corespunde cerințelor unor teme de proiectare pretențioase (parametrii de rezoluție și precizie ridicați), având ca aspect de dificultate viteza de rotație ω ridicată, cerută (chiar la utilizarea unor oglinzi cu un număr “n” de laturi ridicat) pentru a se realiza vitezele de scanare v impuse de anumite aplicații (vezi de exemplu imprimanta laser).

3. Capul de scanare cu oglindă poligonală cu fețe curbe, “cama optică” prezintă toate aspectele, atât cele pozitive cât și cele negative prezentate anterior, cu deosebirea că este posibilă acum compensarea totală a aberației de sfericitate a S.O.1 și utilizarea unui sistem optic extrem de simplu, ieftin în condițiile în care mărimea prețului dispozitivului datorită realizării suprafețelor riglate ale camei este foarte redusă.

Având în vedere toate aceste considerente, **dispozitivul de scanare cu element în mișcare de oscilație** apare ca o soluție viabilă din următoarele considerente:

a. utilizarea oglinzilor plane ca elemente reflectante (simplitate constructivă) dar în mișcare de oscilație, rezultând η cvasiunitar, eliminându-se astfel dezavantajul soluției de la punctul 1. Este adevărat, nu se atinge nici aspectul deosebit care aparține

numai punctului 3, cu S.O.1 foarte simplu și compensare totală a aberației sale de sfericitate. În cazul oglinzii plane oscilante, S.O.1 va trebui proiectat puternic corectat de aberația de sfericitate (dar aceasta numai pe cursa unghiulară, specifică, a oglinzii).

b. utilizarea unor soluții de antrenare a oglinzii care au următoarele **avantaje**:

- gabarit redus, capacitate mare a soluției constructive;
- realizarea unor frecvențe, așadar viteze mari de oscilație, în condițiile unor soluții constructive simple și ieftine (montaj galvanometric sau buclă de oscilograf, de exemplu);
- posibilitatea obținerii unor legi de mișcare impuse pentru echipajul mobil (cu oglindă), deci pentru fasciculul de scanare, prin intermediul unor funcții de comandă ușor de realizat electronic.

Acest ultim aspect, al realizării unor legi de mișcare impuse, poate duce, printr-un calcul de proiectare adecvat, chiar la o compensare totală a aberației de sfericitate a lui S.O.1, eliminându-se astfel singurul dezavantaj funcțional (cel de la punctul a) al soluției. Rămâne eventual în discuție dezavantajul posibil al robusteții mai reduse a soluției galvanometrice față de soluția cu element rotativ.

4.2 Principiul de funcționare

a. **Schema de principiu** a sistemului de scanare cu element oscilant utilizat pentru măsurători dimensionale este cea prezentată în figura 4.1, unde dispozitivul de scanare s-a ales de tip galvanometric, elementul în mișcare fiind o oglindă plană având axa de oscilație în planul feței reflectante.

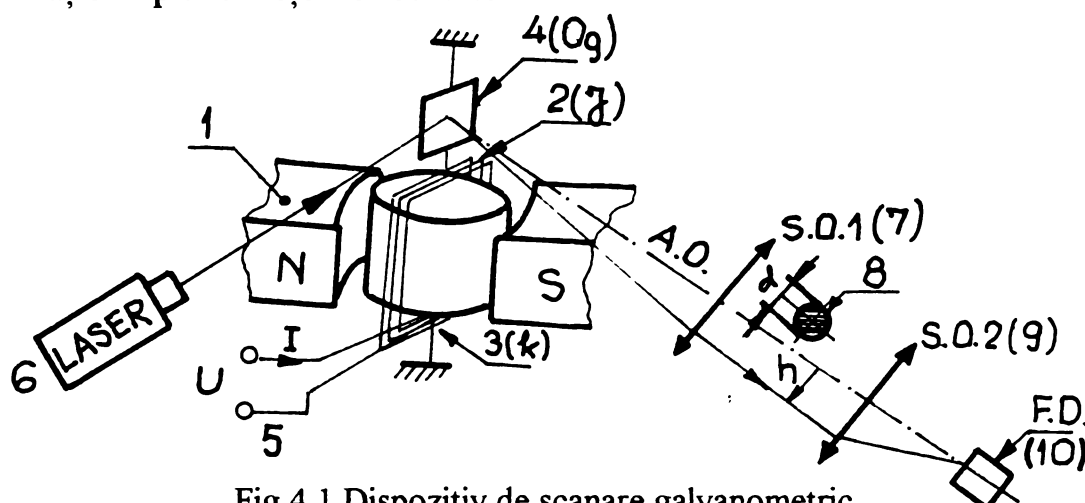


Fig.4.1 Dispozitiv de scanare galvanometric

S-au notat (fig.4.1): 1. magnet permanent; 2. bobina echipajului mobil; 3. arc-fir; 4. oglinda oscilantă; 5. circuitul electric al galvanometrului; 6. laser; 7. sistem optic 1 (colimator); 8. măsurand; 9. sistem optic 2 (obiectiv); 10. Fotodetector

Oscilația se realizează simetric, cu amplitudinea θ_a , în jurul poziției de unghi $\theta = 0$ a oglinzii, poziție corespunzând razei reflectate după axa optică (A.O.) a sistemului optic S.O.1 (Fig.4.2).

Sistemul S.O.1 trebuie să asigure raza emergentă paralelă în permanență cu A.O., oricare ar fi h . Raza scanează spațiul măsurand după o direcție perpendiculară pe A.O. și este captată de S.O.2, sistem de tip obiectiv, care focalizează pe fotodetectorul FD.

Intervalul de timp în care FD nu primește semnal optic este o măsură a

dimensiunii "d" a măsurandului în direcția de scanare, conform relațiilor (3.7) și (3.8).

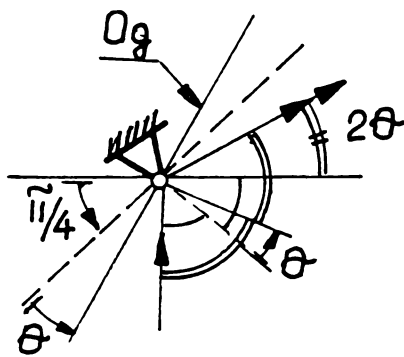


Fig.4.2 Oscilația oglinzii scannerului galvanometric

b. **Dispozitivul de producere a mișcării de oscilație** poate fi teoretic ales corespunzător unuia din tipurile de aparate electrice de măsurare cunoscute [P5]: magnetoelectrice; cu magnet mobil; feromagnetic; electrodinamice; ferodinamice; electrostatice cu lamele vibrante.

Problema principală care trebuie luată în considerare este frecvența de scanare impusă prin tema de proiectare, frecvență care împreună cu domeniul de măsurare (liniar sau unghiular) impune frecvența de oscilație necesară a echipajului mobil.

Unul din factorii de influență esențiali ai acestora este momentul de inerție J al echipajului mobil. Acesta practic impune tipul aparatului electric utilizat: astfel dacă oscilațiile create sunt relativ lente (frecvență mică), se poate alege ca dispozitiv de scanare echipajul unui **galvanometru** (caracterizat, în construcție obișnuită cel puțin, prin frecvențe proprii de oscilație de ordinul a cel mult câțiva Hz).

Galvanometrul este aparatul preferat celorlalte datorită următoarelor aspecte:

- suspendarea echipajului mobil pe arcuri - fir de torsiune și nu pe lagăre pe vîrfuri, ceea ce are drept consecință micșorarea frecărilor (rămâne doar frecarea cu aerul, care este practic neglijabilă cel puțin la frecvențe mici) și micșorarea inerției;
- utilizarea unei amortizări în general exclusiv electromagnetice (produsă de mișcarea bobinei instrumentului în câmpul magnetului permanent), spre deosebire de aparatele care utilizează amortizare pneumatică sau hidraulică (cu mărirea corespunzătoare, la utilizarea unui amortizor cu palete, de exemplu a momentului de inerție a echipajului mobil).

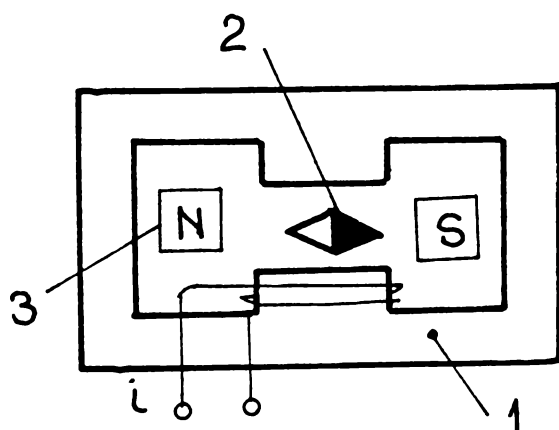


Fig.4.3 Schema de principiu a galvanometrului vibrator

micșorează J prin utilizarea ca echipaj mobil a unui ac magnet permanent (2) de dimensiuni foarte mici dar din materiale ce permit o bună magnetizare [P5], suspendat pe fire elastice.

Reglarea frecvenței proprii de oscilație la un asemenea dispozitiv se face prin sistemul magnetic (3) care realizează un cuplu antagonist comparabil cu cel dat de firele de suspensie.

S-au notat (fig.4.3): 1. circuit feromagnetic cu bobină fixă; 2. ac magnetic; 3. sistem magnetic

Construcția obișnuită a unui galvanometru este cea indicată în figura 4.1. Dacă se dorește obținerea unei frecvențe proprii mai ridicate, se poate utiliza un **galvanometru vibrator**, la care aceasta ajunge la câteva sute de Hz.

Schema unui galvanometru vibrator este indicată în figura 4.3.

Pentru mărirea pulsației proprii - $rel(4.3)_1$ - se mărește k dar mai ales se

Cuplul antagonist rezultat va fi deci suma celui dat de firele de torsiune și a celui magnetic, acesta din urmă fiind reglat, pentru obținerea unei anumite ω_0 , printr-un circuit magnetic de tipul celui din figura 4.4, unde magnetul permanent (4) este elementul de reglare, care se poate roti din exteriorul galvanometrului (restul notațiilor se păstrează din figura 4.3).

Pentru frecvențe de oscilație ridicate necesare în unele aplicații pentru echipajul mobil, este necesară însă alegerea unor dispozitive cu inerție mică și frecvență proprie ridicată (zeci de mii de Hz): **bucla de oscilograf**.

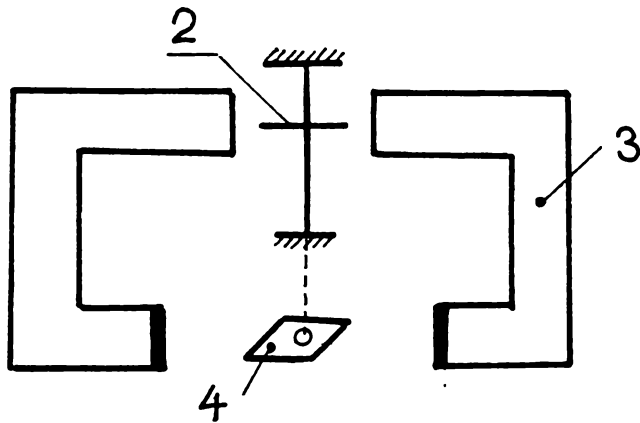


Fig.4.4 Dispozitivul de reglare a momentului antagonist la galvanometrul vibrator

Acest dispozitiv (figura 4.5) este alcătuit din magnetul (1) care realizează inducții în întrefier mari (de ordinul a 1T), mărind astfel fluxul magnetic, deci momentul activ produs la o anumită valoare a curentului (vezi paragraful 4.3), ceea ce duce evident la mărirea amplitudinii oscilațiilor.

Reducerea momentului de inerție J al echipajului mobil se face prin realizarea bobinei dintr-o singură spirală (2), distanța dintre cele două conductoare alegându-se minim posibilă.

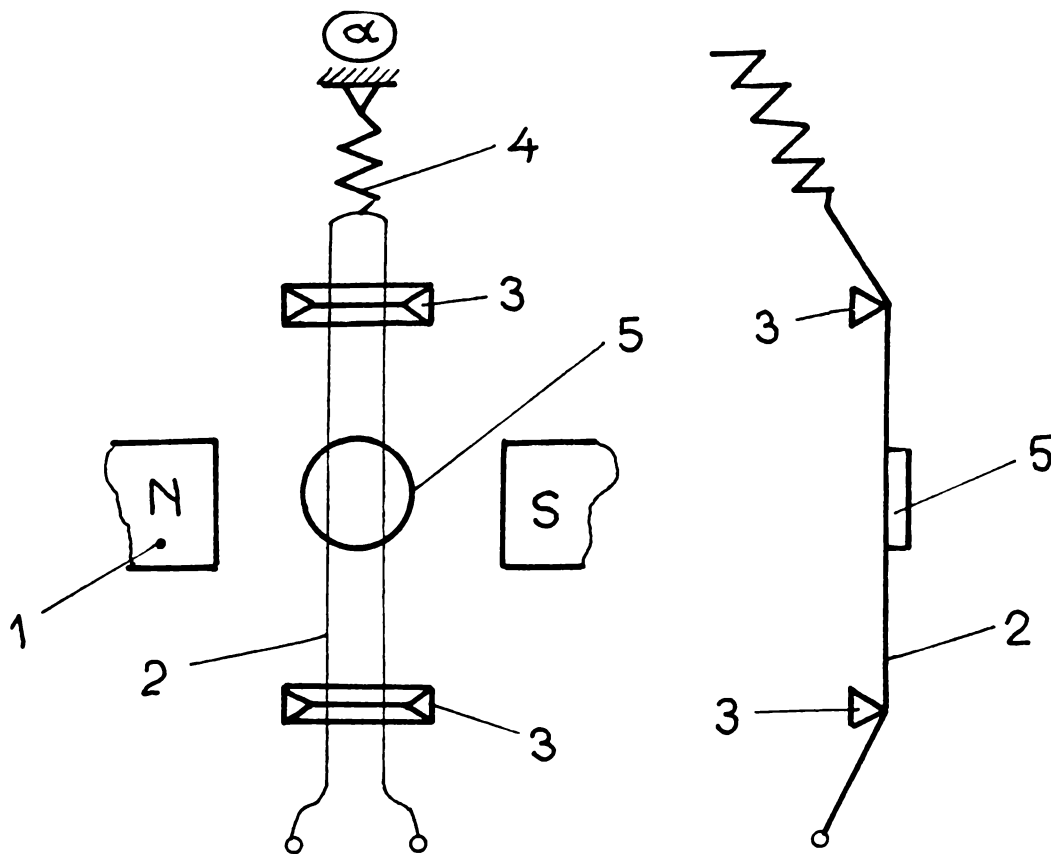


Fig.4.5 Bucla de oscilograf

S-au notat (fig.4.5): 1. magnet permanent; 2. bobină; 3. suport; 4. arc de întindere; 5. oglindă.

Deoarece este necesară pentru obținerea unei frecvențe proprii ridicate, a unui cuplu antagonist cât mai mare, spira (2) se așează tensionat pe suportii (3), întinderea fiind realizată cu arcul (4).

Rezultă astfel o frecvență proprie de ordinul zecilor de mii de Hz, reglarea factorului de amortizare ξ - relația (4.3)₂ - făcându-se prin imersarea echipajului mobil într-o baie de fluid, de exemplu ulei de parafină.

Observație: Frecvența de oscilație este cea care va impune de asemenea gradul de complexitate al modului electronic de prelucrare a semnalului de ieșire și/sau comandă utilizat (paragraful 4.5).

4.3 Ecuțiile de funcționare. Elemente ale calculului de proiectare

Ecuția de mișcare a echipajului galvanometric (Fig.4.1) este:

$$J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta = M(t) \quad (4.1)$$

unde J = momentul de inerție al echipajului mobil;

c = coeficientul de amortizare (magneto-electric) al galvanometrului;

k = coeficientul elastic al arcului - fir de torsiune;

$M(t)$ = momentul magneto-electric activ aplicat pentru generarea mișcării echipajului mobil.

Împărțind rel. (4.1) cu J , rezultă:

$$\ddot{\theta} + 2\xi\omega_0\dot{\theta} + \omega_0^2\theta = \frac{M(t)}{J} \quad (4.2)$$

unde s-au notat:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{J}}; \quad \xi = \frac{c}{2\sqrt{Jk}} \quad (4.3)$$

respectiv pulsația proprie a sistemului oscilant (ω_0) și coeficientul de amortizare adimensional (ξ) ce caracterizează sistemul.

Dintre termenii ecuației de mișcare, doi necesită o discuție suplimentară: momentul activ și momentul de amortizare.

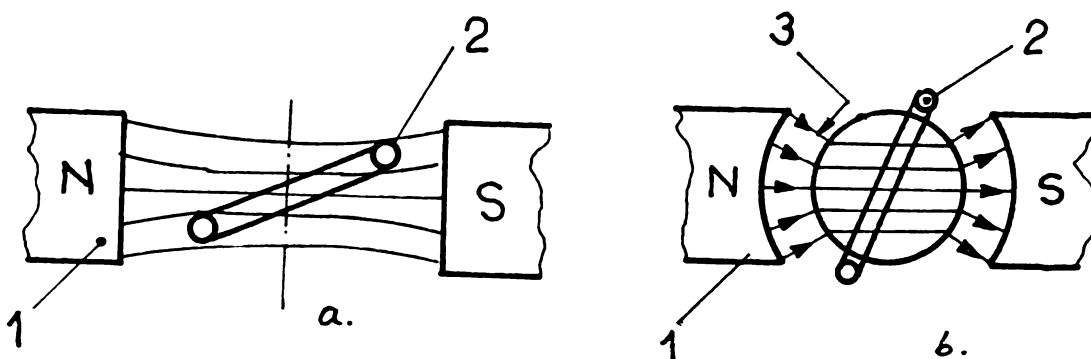


Fig.4.6 Tipuri de circuit magnetic pentru capul galvanometric

S-au notat (fig.4.6): 1. magnet permanent; 2. bobina echipajului mobil; 3. întrefier.

Momentul de torsiune activ, de tip magneto-electric, ce generează mișcarea, este dependent de curentul $i(t)$ care trece prin spirele înfășurării și de fluxul Φ care trece prin cadru:

$$M(t) = \Phi(t) \cdot i(t) \quad (4.4)$$

Expresia fluxului Φ este funcție de tipul circuitului magnetic utilizat.

- Pentru un circuit de tipul celui din figura 4.6a,

$$\Phi(t) = BNS \cdot \cos \theta(t) \quad (4.5)$$

unde: B = inducția magnetică prin cadru;

N = numărul de spire al înfășurării;

S = suprafața cadrului.

- Pentru un circuit de tipul celui din figura 4.6b,

$$\Phi = BNS = ct. \quad (4.6)$$

Această variantă are avantajul unei inducții magnetice B uniforme în întregul; fluxul rezultă constant, ceea ce constituie un avantaj pentru simplitatea rezolvării ecuației (4.1). În consecință, aceasta va fi varianta utilizată, corespunzând de fapt construcțiilor moderne de galvanometre.

Rezultă din relațiile (4.4), (4.6) expresia momentului activ:

$$M(t) = BNS \cdot i(t) \quad (4.7)$$

a. Momentul de amortizare are o componentă dată de frecarea cu aerul, care însă în mod normal se neglijează (pentru aceasta, dimensiunile înfășurării este bine să fie cât mai mici) și o componentă dată de fenomenul de inducție electromagnetică produs prin mișcarea cadrului în câmp magnetic.

Tensiunea electromotoare indusă în înfășurarea galvanometrului are expresia:

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (4.8)$$

unde, din teoria aparatelor electrice, variația înălțurii Ψ este dată de:

$$d\Psi = BSN \cdot d\theta \quad (4.9)$$

așadar:
$$e = -BSN \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (4.10)$$

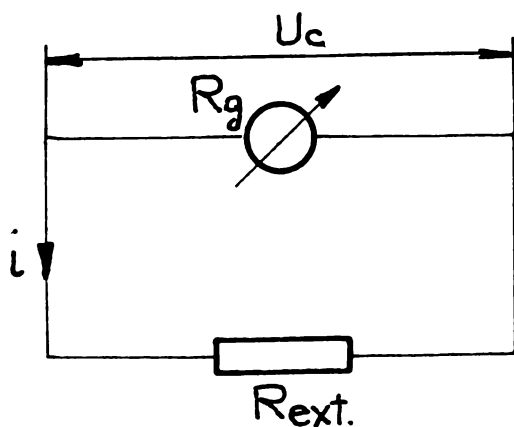


Fig.4.7 Circuitul electric al galvanometrului

Galvanometrul fiind conectat într-un circuit având o rezistență electrică echivalentă R_{ext} (Fig.4.7), valoarea curentului i_e prin circuit (neglijând inductivitatea totală a acestuia) determinat de fenomenul de inducție electromagnetică, se scrie:

$$i_e = \frac{e}{R_g + R_{ext}} \quad (4.11)$$

curent ce se însumează cu cel de intensitate I , care determină momentului activ - rel.(4.4).

Curentul i_e determină în același mod,

momentul de amortizare:

$$M_a = BSN \cdot i_e(t) \quad (4.12)$$

Făcând succesiv înlocuirile, cu rel. (4.10) în (4.11) și apoi în (4.12), rezultă:

$$M_a(t) = -\frac{(BSN)^2}{R_g + R_{ext}} \cdot \frac{d\theta}{dt} \quad (4.13)$$

moment care este de amortizare datorită chiar dependenței de viteza unghiulară a echipajului mobil.

În consecință, ținând seama de ecuația (4.1) și de relația (4.13), se identifică expresia **coeficientului de amortizare**:

$$c = \frac{(BSN)^2}{R_g + R_{ext}} + a \quad (4.14)$$

frecarea cu aerul, dată de coeficientul a putînd fi considerată, după cum s-a spus, în general neglijabilă.

Reglarea valorii dorite a factorului de amortizare ξ -relația (4.3)₂ - se face [P5] așadar, ținînd seama de (4.14), prin modificarea rezistenței exterioare R_{ext} a circuitului în care este conectat galvanometrul.

Pentru obținerea regimului critic ($\xi = 1$) de funcționare a galvanometrului va exista așadar o valoare R_{kext} obținută din condiția: $\xi = \frac{c}{2\sqrt{Jk}} = 1$ (4.15)

de unde, utilizînd relația (4.14), rezultă **rezistența critică totală**:

$$R_k = R_g + R_{kext} = \frac{(BSN)^2}{2\sqrt{Jk} - a} \quad (4.16)$$

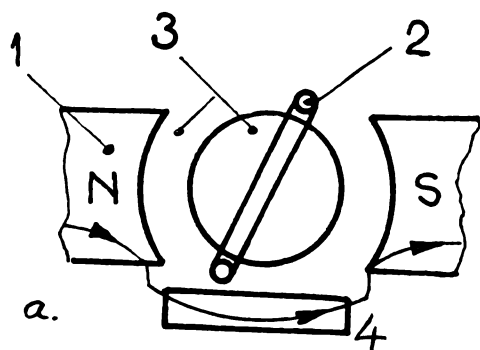


Fig.4.8 Șuntarea circuitului magnetic al galvanometrului

Reglarea inducției magnetice a magnetului permanent se face prin utilizarea unui **șunt magnetic**:

S-au notat (fig.4.8): 1. magnet permanent; 2. bobină mobilă; 3. întrefier; 4. șunt magnetic

Inducția B din întrefier scade dacă șuntul se apropie de magnet (o parte din fluxul magnetic fiind deviat prin șunt) și invers.

Observație: Modificînd B se modifică și constanta galvanometrului (sensibilitatea statică a acestuia, privit ca aparat de măsură) - din ecuațiile (4.2) și (4.4) rezultînd:

$$S_g = \frac{BNS}{J} \quad (4.17)$$

prin modificarea momentului activ $M(t)$ - rel. (4.4), deci stabilirea acestuia se face după impunerea regimului de amortizare al echipajului galvanometric.

b. Funcția de scanare unghiulară $\theta(t)$ este dată de funcția de scanare liniară $h(t)$ (Fig.4.2), prin legătura care există între poziția razei ce scanează spațiul măsurand și unghiul de rotație al oglinzii plane. Din figura 4.2, se poate scrie:

$$h(\theta) = L \cdot \operatorname{tg} 2\theta \quad (4.18)$$

unde $L = -\bar{f}, \bar{f}$ fiind distanța focală obiect a sistemului optic S.O.1. Din relația (4.18) se obține:

$$\theta(t) = +\frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{h(t)}{L} \quad (4.19)$$

c. Funcția de comandă

Se poate lucra în **trei ipoteze de lucru** care dau cele trei variante de dispozitiv de scanare posibile:

1. se realizează un profil de tip dinte de ferăstrău pentru $h(t)$, cu o porțiune activă liniară și una rapidă, de revenire –varianta 1, fig.4.9a.
2. se alege un profil convenabil, ușor de generat, al funcției de curent $i(t)$ și, prin rezolvarea ecuației (4.1), rezultă funcția $\theta(t)$ care prin relația (4.1) dă funcția de scanare $h(t)$ – varianta 2 din fig.4.9a.
3. cu funcție de scanare $h(t)$ liniară pe tronsoane temporale, realizînd o funcție de curent de comandă $i(t)$ convenabilă pentru a obține momentul $M(t)$ care să dea funcția h dorită.

Varianta 3 are evident avantajul unei părți mult mai simple pentru procesarea semnalului în modulul electronic ME, dificultatea fiind în întregime transferată pe partea de proiectare. Partea de generare a semnalului discretizat $i(t)$ din ME, are însă oricum același grad de complexitate indiferent de profilul lui i ; așadar acest avantaj al variantei 1 este lipsit de un avantaj al soluției 2 care să-l contrabalanseze. În consecință varianta 1 va fi net preferată variantei 2.

De asemenea, pentru variantele din fig.4.9a, indicate în literatura de specialitate [B4], gradul de acoperire η are valoarea de 0,66 pentru varianta 2, respectiv de 0,7 pentru varianta 1. Varianta 3, din fig.4.9b, dezvoltată ca soluție originală în acest capitol din lucrare, are avantajul obținerii unui η mult mai aproape de 1, avînd în vedere că τ ($2\tau =$ timpul de “întoarcere” a oglinzii) se alege mult mai scurt decît t_a ($2t_a =$ timpul activ “dus” sau “întors” al razei în spațiul scanat).

Avînd în vedere toate aceste aspecte, varianta 3 va fi preferată și dezvoltată în cele ce urmează.

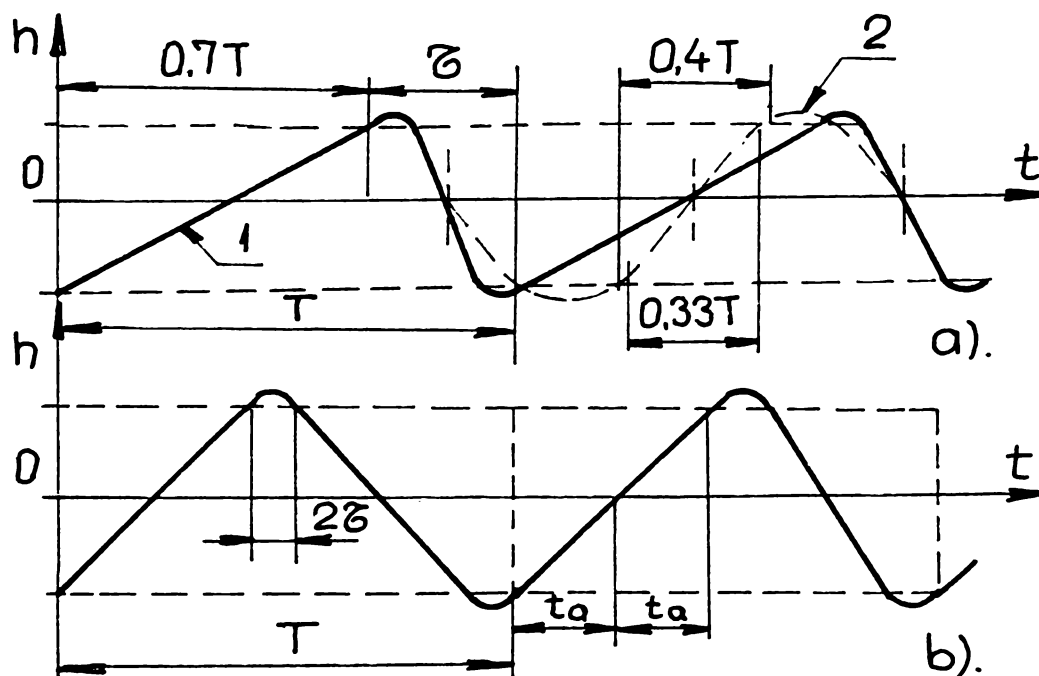


Fig.4.9 Funcții de scanare $h(t)$: a) variantele din literatura de specialitate [B4];

b) varianta dezvoltată în lucrare

Pentru obținerea funcției de comandă, din relația (4.19) rezultă:

,

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\dot{h}}{L} \\ 1 + \left(\frac{h}{L}\right)^2 \\ \ddot{\theta} = \frac{1}{2L} \cdot \frac{\ddot{h} \left[1 + \left(\frac{h}{L}\right)^2\right] - 2 \frac{h \cdot \dot{h}^2}{L^2}}{\left[1 + \left(\frac{h}{L}\right)^2\right]^2} \end{cases} \quad (4.20)$$

Înlocuind rel. (4.20) în (4.1), momentul de torsiune activ va avea expresia:

$$M(t) = \frac{-J}{L^3} \cdot \frac{h\dot{h}^2}{\left[1 + \left(\frac{h}{L}\right)^2\right]^2} + \frac{1}{2L} \cdot \frac{c\dot{h} + J\ddot{h}}{1 + \left(\frac{h}{L}\right)^2} + \frac{k}{2} \arctg \frac{h}{L} \quad (4.21)$$

Disponînd astfel de momentul $M(t)$, utilizînd relația (4.7) rezultă funcția de curent $i(t)$, **funcția de comandă** care trebuie asigurată pentru obținerea funcției de scanare $h(t)$ impuse:

$$i(t) = \frac{M(t)}{BNS} \quad (4.22)$$

4.4 Determinarea funcției de scanare

Se dorește ca scanarea spațiului măsurand să fie uniformă, adică viteza de scanare v să fie constantă.

Funcția de scanare $h(t)$ trebuie așadar să aibe expresia:

$$h(t) = \begin{cases} v \cdot t - \frac{D}{2}, & t \in \left[jT, \left(j + \frac{1}{2} \right) T \right] \\ \frac{D}{2} - v \cdot t, & t \in \left[\left(j + \frac{1}{2} \right) T, (j+1)T \right] \end{cases}, j \in Z \quad (4.23)$$

deci o funcție periodică, avînd graficul de alura celui prezentat în figura 4.9b (dar cu porțiuni de întoarcere ascuțite).

Se observă însă că, pentru o asemenea expresie a lui $h(t)$, din rel. (4.23), rezultă viteza unghiulară de scanare:

$$\dot{\theta}(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\frac{v}{L}}{1 \pm \frac{vt - \frac{D}{2}}{L^2}} \quad (4.24)$$

(semnele \pm sunt respectiv pentru intervalele temporale exprimate în rel.(4.23)), viteză unghiulară care nu se poate anula: $\dot{\theta}(t) \neq 0$, $(\forall)t$, așadar nu se pot realiza punctele de întoarcere ale funcțiilor $h(t)$ și $\theta(t)$.

Pentru a se putea îndeplini condiția:

$$\dot{\theta}(t) = 0 \text{ pentru } t \in \{kT, k \in Z\} \quad (4.25)$$

așadar pentru ca mișcarea oglinzii să fie de tip oscilant, profilul funcției $h(t)$ trebuie prevăzut cu porțiuni de racordare corespunzătoare, care sunt cele de durată 2τ (fig.4.9b).

Se observă că s-a ales un profil convenabil pentru ca porțiunea $h \in [-D/2, D/2]$ să-și păstreze liniaritatea dorită, iar porțiunilor de racord, inactive, să le corespundă un interval de timp 2τ minim de parcurgere.

Expresia (4.23) va fi deci completată corespunzător fie cu o funcție de tip polinomial, fie cu una de tip sinusoidal care să realizeze racordul. În continuare se va face determinarea lui $h(t)$ pentru fiecare din aceste două cazuri.

a. Legea liniară + polinomială

Cazul 1: $t \in [jT, jT + \tau]$

$$h(t) = at^2 + bt + c ; \dot{h} = 2at + b ; \ddot{h} = 2a \quad (4.26)$$

unde $a, b, c = \text{constante}$.

Se impun condițiile:

$$\begin{cases} h(0) = -H \\ h(\tau) = -\frac{D}{2} \end{cases} ; \begin{cases} \dot{h}(0) = 0 \\ \dot{h}(\tau) = v \end{cases} \quad (4.27)$$

Din relațiile (4.26), utilizând (4.27)_{1,3,4} rezultă:

$$a = \frac{v}{2\tau} ; b = 0 ; c = -H \quad (4.28)$$

unde s-a notat: $|h_{\max}| = +H$

Din rel. (4.27)₂ și (4.28) rezultă:

$$v \cdot \tau = 2H - D \quad (4.29)$$

De asemenea, din condiția de parcurgere a zonei liniare a caracteristicii:

$$\left(\frac{T}{2} - 2\tau\right)v = D \quad (4.30)$$

rezultă, ținând seama de relația (4.29):

$$v \cdot T = 2(4H - D) \quad (4.31)$$

Se pot așadar obține intervalele de timp T și τ impunându-se, prin tema de proiectare viteza de scanare v , respectiv dimensiunea D și alegându-se H convenabil (cât mai aproape de D).

Cazul 2: $t \in [jT + \tau, jT + T/2 - \tau]$ - este variabilă pentru $h(t)$ rel. (4.23)₁.

Cazul 3: $t \in [jT + T/2 - \tau, jT + T/2 + \tau]$

Funcția $h(t)$ este tot de tip parabolic - rel. (4.26), dar condițiile sunt în acest caz:

$$\begin{cases} h\left(\frac{T}{2} - \tau\right) = h\left(\frac{T}{2} + \tau\right) = \frac{D}{2} \\ h\left(\frac{T}{2}\right) = H \end{cases} ; \begin{cases} \dot{h}\left(\frac{T}{2}\right) = 0 \\ \dot{h}\left(\frac{T}{2} - \tau\right) = -\dot{h}\left(\frac{T}{2} + \tau\right) = v \end{cases} \quad (4.32)$$

Efectuând calculele, din rel. (4.32)_{2,3,4} rezultă:

$$a = -\frac{v}{2\tau} ; b = \frac{vT}{2\tau} ; c = H - \frac{vT^2}{8\tau} \quad (4.33)$$

iar din (4.32)₁, rezultă relația (4.29).

Cazul 4: $t \in [T/2 + \tau + jT, T - \tau + jT]$ - funcția $h(t)$ are expresia (4.23)₂.

Cazul 5: $t \in [jT + T - \tau, (j + 1)T]$ - se obține aceeași expresie pentru h ca și în cazul 1.

Centralizarea rezultatelor s-a realizat în tabelul 4.1:

b. Legea liniară + sinusoidală

Cazul 1: $t \in [jT, jT + \tau]$ - funcția de racord și derivatele ei au expresia:

$$\begin{cases} h(t) = a + b \sin(\Omega t + \varphi) \\ \dot{h}(t) = b\Omega \cos(\Omega t + \varphi) \\ \ddot{h}(t) = -b\Omega^2 \sin(\Omega t + \varphi) \end{cases} \quad (4.34)$$

Din relațiile (4.27)_{3,1} respectate și în acest caz, rezultă:

$$\begin{cases} \varphi = \frac{\pi}{2} \\ a = -H - b \end{cases} \quad (4.35)$$

Din rel. (4.27)_{2,4} cu (4.34) rezultă:

$$\begin{cases} b \sin \Omega \tau = -\frac{v}{\Omega} \\ b \cos \Omega \tau = b + H - \frac{D}{2} \end{cases} \quad (4.36)$$

de unde:
$$b = -\frac{v^2}{(2H - D)\Omega^2} - \frac{1}{2} \left(H - \frac{D}{2} \right) \quad (4.37)$$

respectiv:
$$\operatorname{tg} \Omega \tau = \frac{2}{\frac{2v}{(2H - D)\Omega} - \frac{(2H - D)\Omega}{2v}} \quad (4.38)$$

Relația (4.38) reprezintă o ecuație de tip transcendent având ca necunoscută pulsația Ω .

Alegînd τ dintr-o condiție de tipul (4.29), ca intervalul de timp în care, dacă spotul ar merge cu viteză constantă ar parcurge o distanță dublă față de cea parcursă de fapt, ecuația (4.38) devine:

$$\operatorname{tg} \Omega \tau = \frac{2}{\frac{2}{\Omega \tau} - \frac{\Omega \tau}{2}} \quad (4.38)'$$

În Anexa 3 s-a făcut rezolvarea pe cale numerică (grafică) a acestei ecuații pentru două valori ale vitezei de scanare v , considerîndu-se următorul exemplu numeric pentru datele de intrare:

$D = 30 \text{ mm}$; $H = 16 \text{ mm}$ și $v = 150 \cdot 10^3 \text{ mm/s}$ rezultă $\Omega = 165 \cdot 10^3 \text{ rad/s}$ (Anexa 3.1).

Pentru aceleași date de intrare și $v = 300 \cdot 10^3 \text{ mm/s}$ rezultă $\Omega = 439 \cdot 10^3 \text{ rad/s}$ (Anexa 3.2). Intervalul temporal τ nefiind impus, a putut fi calculat dintr-o relație de tipul relației (4.29)₄, rezultînd $\tau = 0,88 \cdot 10^{-5} \text{ s}$, valoare utilizată în ambele situații.

În concluzie, din (4.34) și (4.35), rezultă:

$$h(t) = -H + b(1 - \cos \Omega t) \quad (4.39)$$

unde b este dat din rel. (4.37).

Cazul 2: $t \in [jT + \tau, jT + T/2 - \tau]$ - funcția $h(t)$ are expresia (4.23)₁.

Cazul 3: $t \in [jT + T/2 - \tau, jT + T/2 + \tau]$ - sunt valabile rel. (4.34), cu condițiile (4.32).

Din rel. (4.32)_{3,2}, introducând (4.34), rezultă:

$$\begin{cases} \varphi = \frac{\pi}{2} - \frac{\Omega T}{2} \\ a = H - b \end{cases} \quad (4.40)$$

Din rel (4.32)_{1,4} rezultă cu rel. (4.34):

$$b = \frac{v^2}{(2H - D)\Omega^2} + \frac{1}{2} \left(H - \frac{D}{2} \right) \quad (4.41)$$

în timp ce ecuația de obținere a lui Ω rezultă identică cu ecuația (4.38).

Pentru a uniformiza notațiile, b se va considera cel dat de rel.(4.37), iar rel. (4.40)₂ va deveni atunci:

$$a = H + b \quad (4.40)_2$$

Rezultă:
$$h(t) = H + b \left[1 + \cos \Omega \left(\frac{T}{2} - t \right) \right] \quad (4.42)$$

Cazul 4: $t \in [jT + T/2 + \tau, jT + T/2 - \tau]$ - funcția $h(t)$ are expresia (4.23)₂.

Cazul 5: $t \in [jT + T - \tau, (j + 1)T]$ - se obține aceeași expresie pentru h ca și în cazul 1.

4.5 Determinarea funcției de comandă a dispozitivului

Utilizând rel. (4.21) și rezultatele obținute în paragraful anterior, în tabelele 4.1 și 4.2 s-au prezentat respectiv expresiile obținute pentru momentul de torsiune $M(t)$ respectiv pentru legea liniară + polinomială și liniară + sinusoidală a funcției de scanare $h(t)$, funcția de comandă $i(t)$ fiind dată de relația (4.22).

Funcția de scanare și momentul activ pentru profilul liniar+polinomial al funcției h(t)

Tabelul 4.1

Dom.	Intervalul temporal	Funcția de scanare h(t)	Momentul activ M(t)
1	$(jT, jT + \tau)$	$\frac{v^2}{2\tau} - H$	$\frac{-J}{2L^3} \cdot \frac{v^2 t^2 \left(\frac{v^2}{2\tau} - H \right)}{\tau^2 \left[1 + \frac{1}{L^2} \left(\frac{v^2}{2\tau} - H \right)^2 \right]^2} + \frac{v}{2L\tau} \frac{ct - J}{1 + \frac{1}{L^2} \left(\frac{v^2}{2\tau} - H \right)^2} + \frac{k}{2} \arctg \left[\frac{1}{L} \left(\frac{v^2}{2\tau} - H \right) \right]$
2	$\left(jT + \tau, jT + \frac{T}{2} - \tau \right)$	$v - \frac{D}{2}$	$\frac{-J}{2L^3} \cdot \frac{v^2 (2vt - D)}{\tau^2 \left[1 + \left(\frac{2vt - D}{2L} \right)^2 \right]^2} + \frac{1}{2L} \cdot \frac{cv}{1 + \left(\frac{2vt - D}{2L} \right)^2} - \frac{k}{2} \arctg \frac{2vt - D}{2L}$
3	$\left(jT + \frac{T}{2} - \tau, jT + \frac{T}{2} + \tau \right)$	$-\frac{v^2}{2\tau} + \frac{vT}{2\tau}t + H + \frac{vT^2}{8\tau}$	$-J \left(\frac{v}{2L\tau} \right)^3 \frac{(T - 2t)^2 \left(-t^2 + Tt - \frac{T^2}{4} + \frac{2H\tau}{v} \right)}{\left[1 + \left(\frac{v}{2L\tau} \right)^2 \left(-t^2 + Tt - \frac{T^2}{4} + \frac{2H\tau}{v} \right)^2 \right]^2} + \frac{v}{2L\tau} \frac{c \left(\frac{T}{2} - t \right) - J}{1 + \frac{v}{2L\tau} \left(-t^2 + Tt - \frac{T^2}{4} + \frac{2H\tau}{v} \right)^2}$ $+ \frac{k}{2} \cdot \arctg \frac{v \left(-t^2 + Tt - \frac{T^2}{4} + \frac{2H\tau}{v} \right)}{2L\tau}$
4	$\left[jT + \frac{T}{2} + \tau, (j+1)T - \tau \right]$	$-v + \frac{D}{2}$	$\frac{-J}{2L^3} \cdot \frac{v^2 (-2vt + D)}{\tau^2 \left[1 + \left(\frac{2vt - D}{2L} \right)^2 \right]^2} - \frac{1}{2L} \cdot \frac{cv}{1 + \left(\frac{2vt - D}{2L} \right)^2} - \frac{k}{2} \arctg \frac{2vt - D}{2L}$
5	$\left[(j+1)T - \tau, (j+1)T \right]$	$\frac{v^2}{2\tau} - H$	Expresie identică cu cea din cazul 1

Funcția de scanare și momentul activ pentru profilul liniar+sinusoidal al funcției h(t)

Tabelul 4.2

Dom.	Intervalul temporal	Funcția de scanare h(t)	Momentul activ M(t)
1	$(jT, jT + \tau)$	$-H - b(1 - \cos\Omega t)$ unde: b - vezi rel. (4.37) Ω - vezi rel. (4.38)	$\frac{-J}{L^3} b^2 \Omega^2 \cdot \frac{[H + b(1 - \cos\Omega t)] \sin^2 \Omega t}{\left[1 + \left(\frac{H + b(1 - \cos\Omega t)}{L}\right)^2\right]^2} - \frac{b\Omega}{2L} \cdot \frac{c \sin \Omega t + J\Omega \cos \Omega t}{1 + \left(\frac{H + b(1 - \cos\Omega t)}{L}\right)^2} - \frac{k}{2} \operatorname{arctg} \frac{H + b(1 - \cos\Omega t)}{L}$
2	$\left(jT + \tau, jT + \frac{T}{2} - \tau\right)$	$v - \frac{D}{2}$	$\frac{-J}{2L^3} \cdot \frac{v^2(2vt - D)}{\tau^2 \left[1 + \left(\frac{2vt - D}{2L}\right)^2\right]^2} + \frac{1}{2L} \cdot \frac{cv}{1 + \left(\frac{2vt - D}{2L}\right)^2} + \frac{k}{2} \operatorname{arctg} \frac{2vt - D}{2L}$
3	$\left(jT + \frac{T}{2} - \tau, jT + \frac{T}{2} + \tau\right)$	$H + b \left[1 + \cos\Omega \left(\frac{T}{2} - t\right)\right]$	$\frac{-J}{L^3} b^2 \Omega^2 \cdot \frac{[H + b \left[1 + \cos\Omega \left(\frac{T}{2} - t\right)\right]] \sin^2 \Omega \left(\frac{T}{2} - t\right)}{\left[1 + \left(\frac{H + b \left[1 + \cos\Omega \left(\frac{T}{2} - t\right)\right]}{L}\right)^2\right]^2} + \frac{b\Omega}{2L} \cdot \frac{c \sin \Omega \left(\frac{T}{2} - t\right) - J\Omega \cos \Omega \left(\frac{T}{2} - t\right)}{1 + \left(\frac{H + b \left[1 + \cos\Omega \left(\frac{T}{2} - t\right)\right]}{L}\right)^2} +$ $+ \frac{k}{2} \operatorname{arctg} \frac{H + b \left[1 + \cos\Omega \left(\frac{T}{2} - t\right)\right]}{L}$
4	$\left[jT + \frac{T}{2} + \tau, (j+1)T - \tau\right]$	$-v + \frac{D}{2}$	$\frac{-J}{2L^3} \cdot \frac{v^2(-2vt + D)}{\tau^2 \left[1 + \left(\frac{2vt - D}{2L}\right)^2\right]^2} - \frac{1}{2L} \cdot \frac{cv}{1 + \left(\frac{2vt - D}{2L}\right)^2} - \frac{k}{2} \operatorname{arctg} \frac{2vt - D}{2L}$
5	$[(j+1)T - \tau, (j+1)T]$	$-H - b(1 - \cos\Omega t)$	Expresie identică cu cea din cazul 1

Capitolul 5

SCANAREA BI (2D) ȘI TRIDIMENSIONALĂ (3D)

În Capitolele 3 și 4 s-au luat în considerare, analizat și proiectat dispozitive pentru scanarea unidimensională (1D).

În cele ce urmează se va aborda realizarea sistemelor pentru scanarea bi (2D) și tridimensională (3D).

5.1 Scanarea bidimensională (2D)

5.1.1 Baleierea planului xOy se asigură prin 2 scanere de tip oscilant, scanerul 1 (Sc.1) asigurând scanarea după axa Oy verticală, iar scanerul 2 (Sc.2) după axa Ox orizontală (fig.5.1).

Funcție de unghiurile de rotație φ și respectiv θ ale scanerelor, se poate scrie așa:

$$\begin{cases} x = l \cdot \operatorname{tg} 2\theta, & \theta \in (-\theta_a, \theta_a) \\ y = L \cdot \operatorname{tg} 2\varphi, & \varphi \in (-\varphi_a, \varphi_a) \end{cases} \quad (5.1)$$

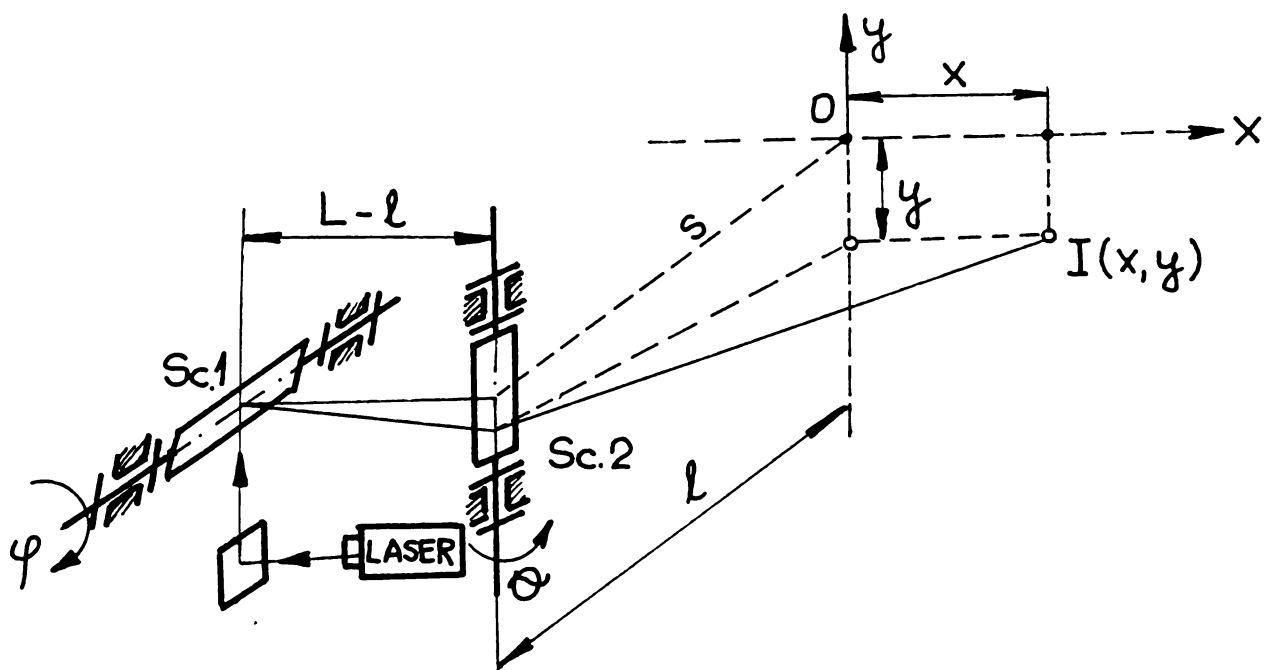


Fig.5.1 Dispozitiv de scanare bidimensional (2D)

Observație: Pentru ușurința scrierii relațiilor s-a considerat (vezi Fig.5.2) poziția $\varphi = 0$ corespunzând poziției oglinzii înclinată cu $\pi/4$ față de orizontală, când raza este reflectată după direcția orizontală și se parcurge (prin rotația oglinzii Sc.2), axa Ox . Cu aceste considerente, urmărind construcția din figura 5.2, rezultă imediat relația (5.1)₂.

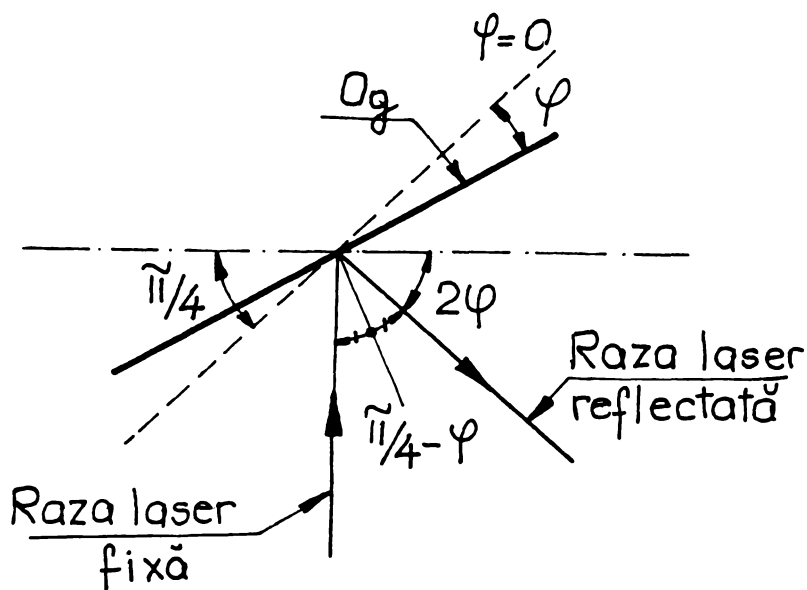


Fig.5.2 Considerarea unghiurilor oglinzii la scanarea 2D

$$\begin{cases} 2x_a = 2l \cdot \operatorname{tg} 2\theta_a \\ 2y_a = 2L \cdot \operatorname{tg} 2\varphi_a \end{cases} \quad (5.3)$$

Observație: Tot pentru ușurința scrierii, s-a ales distanța dintre axa de rotație a oglinzii Sc.1 și planul xOy, L, evident măsurată prin rabaterea cu $\pi/2$ a direcției razei orizontale (de $\theta = 0$ și $\varphi = 0$) în punctul în care acesta atinge oglinda Sc.2. A rezultat astfel (vezi Fig.5.1), distanța dintre axele de rotație ale celor 2 scanere, egală cu L - 1.

5.1.2 Sincronizarea scanerelor

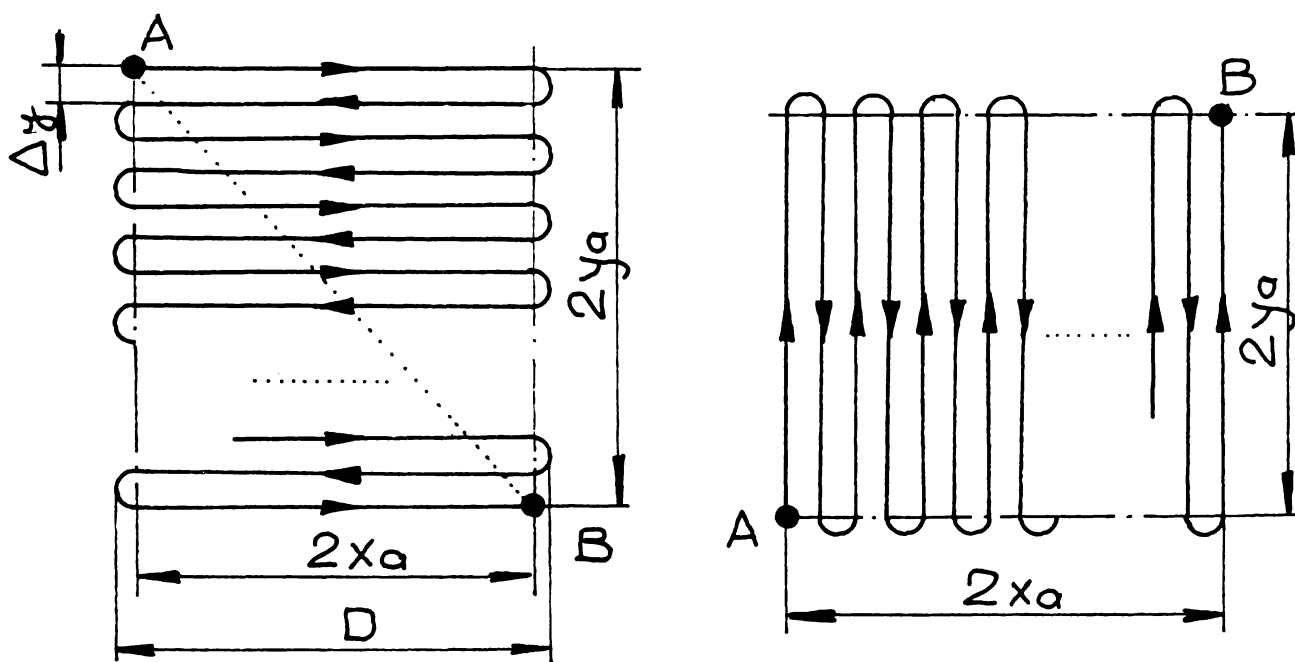


Fig.5.3 Variante de scanare 2D

Scanarea se poate realiza în două **moduri** (Fig.5.3):

- parcurend spațiul scanat pe orizontală în mod continuu, iar pe verticală cu "pași" discreți;

O discuție perfect omoloagă se poate realiza pentru Sc.2. Rezultă imediat după relația (5.1)₁ și de asemenea faptul că, prin construcție (Fig.5.1):

$$\begin{aligned} I(\varphi = 0, \theta = 0) &= \\ &= 0(x = 0, y = 0) \end{aligned} \quad (5.2)$$

Amplitudinile unghiulare θ_a și φ_a din relația (5.1) sunt alese astfel încât să se scaneze suprafața dorită, de exemplu un dreptunghi (sau o suprafață înscrisă într-un dreptunghi) cu laturile:

b. parcurgînd axa verticală în mod continuu, iar discretizarea parcursului realizîndu-se după direcția orizontală.

În continuare se va opta pentru prima variantă de scanare (Fig.5.3a).

Problema care trebuie rezolvată este **determinarea funcțiilor de scanare unghiulare $\theta(t)$ și $\varphi(t)$** , respectiv a celor liniare, $x(t)$ și $y(t)$, care rezultă din cele unghiulare prin relațiile (5.1).

Condițiile inițiale sunt impuse de alegerea punctului din care trebuie să înceapă scanarea. Alegînd punctul de început A și scanarea pe Ox stînga - dreapta și retur, iar pe Oy de sus în jos cu revenire rapidă din punctul B, final, în A (vezi Fig. 5.3a), condițiile inițiale sunt:

$$t = t_0 : \begin{cases} x_0 = -x_a \\ y_0 = -y_a \end{cases}; \begin{cases} \theta_0 = -\theta_a \\ \varphi_0 = +\varphi_a \end{cases} \quad (5.4)$$

iar graficele funcțiilor θ și φ , respectiv x și y au alurile în figura 5.4:

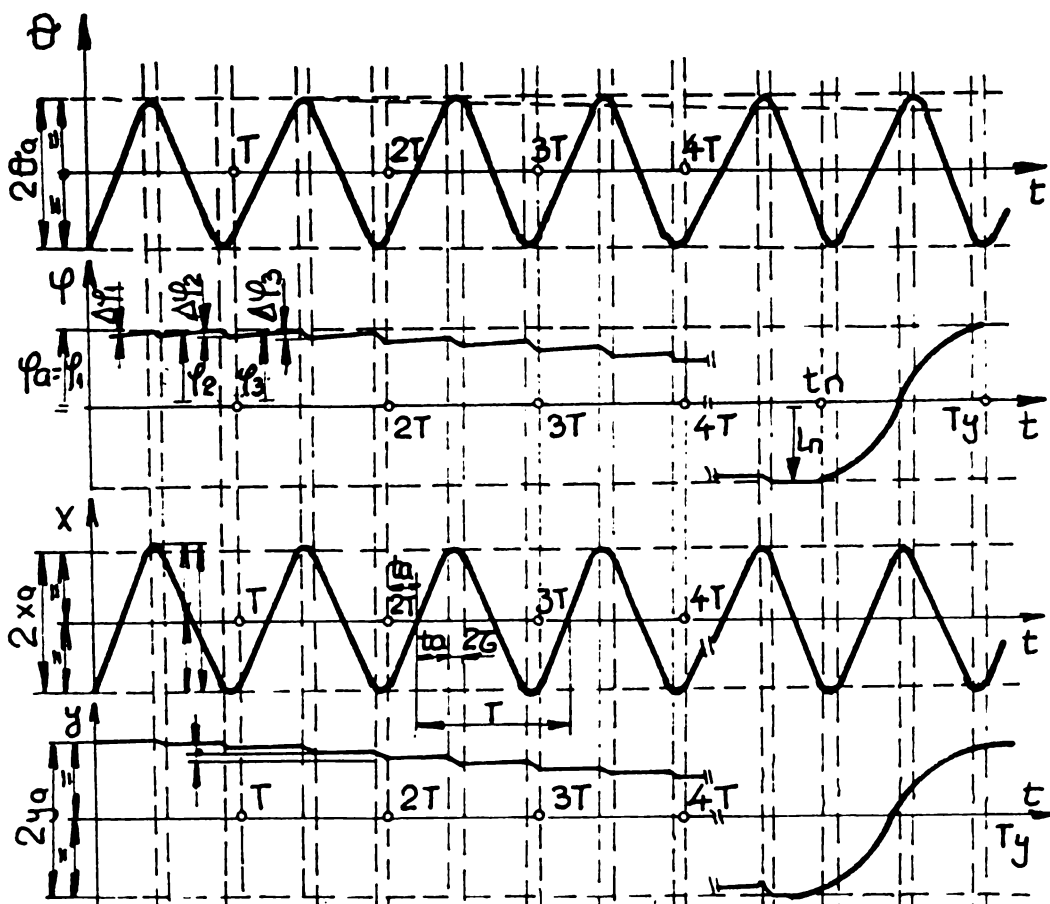


Fig.5.4 Graficele funcțiilor de scanare unghiulare și liniare la scanarea 2D

Funcțiile θ și x sunt cele deduse și discutate în paragraful 4.4, cu funcția x jucînd rolul funcției h , așadar fiind liniară - datorită funcției de comandă $i(t)$ alese - pe porțiunea "activă" (de durată $2t_a$) și avînd profilul polinomial sau sinusoidal (tab.4.1,

respectiv tab.4.2) pe porțiunile inactive, “de întoarcere”, de durată 2τ fiecare - vezi Fig.5.4. Expresiile funcțiilor, transcrise cu noile notații după cele din capitolul 4, sunt prezentate în tabelul 5.1.

Funcția de scanare $x(t)$

Tabelul 5.1

Dom.	Intervalul temporal	Funcția de scanare $x(t)$ ¹	
		liniară + polinomială	liniară + sinusoidală
1	$\left(jT, jT + \frac{T}{2} - \tau\right)$	$v t - \frac{D}{2}$	$v t - \frac{D}{2}$
2	$\left(jT + \frac{T}{2} - \tau, jT + \frac{T}{2} + \tau\right)$	$-\frac{v t^2}{2\tau} + \frac{v T}{2\tau} t + x_a - \frac{v T^2}{8\tau}$	$x_a + b \left[1 + \cos \Omega \left(\frac{T}{2} - t\right)\right]$
3	$\left[jT + \frac{T}{2} + \tau, (j+1)T - \tau\right]$	$-v t + \frac{D}{2}$	$-v t + \frac{D}{2}$
4	$[(j+1)T - 2\tau, (j+1)T]$	$\frac{v t^2}{2\tau} - x_a$	$x_a + b [1 + \cos \Omega t]$

1) Funcția de scanare unghiulară θ rezultă transcriind rel. (4.19):

$$\theta(t) = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{arctg} \frac{x(t)}{1}$$

2) b - din rel. (4.37); Ω - din rel. (4.38)

Funcțiile φ și y

Se impune, prin valoarea pasului Δy , rezoluția de scanare după Oy :

$$N \left[\frac{\text{nr. linii}}{m} \right] = \frac{1}{\Delta y} \quad (5.5)$$

Funcție de valoarea lui Δy , vor exista n scanări necesare pe Ox pentru parcurgerea lui $2y_a$:

$$n = \left[\frac{2y_a}{\Delta y} \right] \quad (5.6)$$

cu observația că atunci spațiul scanat după Oy va fi ceva mai mic, ordonata minimă atinsă de ultima linie (scanată după Ox) fiind:

$$y_{\min} = -n \cdot \Delta y + y_a, |y_{\min}| \leq y_a \quad (5.7)$$

În general însă, pentru majoritatea aplicațiilor, datorită rezoluției R mari (Δy mic), în special atunci când $\Delta y \ll y_a$, diferența dintre y_a și $|y_{\min}|$ poate fi neglijată și $y_{\min} \cong -y_a$.

Numărul “ $n+1$ ” constituie, după cum se observă din figurile 3a și 4, și numărul de paliere al funcțiilor $\varphi(t)$ și $y(t)$.

Se impune așadar **determinarea șirurilor** $\varphi_j, j = 0, n$, ($\varphi_0 = \varphi_a; y_0 = y_a$).

Pentru y_j este evident că, deoarece $\Delta y = \text{ct.}$,

$$y_j = y_a - j \Delta y, j = \overline{0, n} \quad (5.8)$$

Pentru deducerea lui φ_j , trebuie ținut seama că dependența $y = y(\varphi)$ - rel. (5.1)₂ - este neliniară, deci la pași constanți pe Oy vor corespunde (sunt necesari) pași variabili a lui φ . Din relația (5.1)₂:

$$\varphi = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{y}{L} \quad (5.9)$$

Scriind trecerea de la pasul j la pasul $j+1$, se obține așadar sistemul (Fig.5.5):

$$\begin{cases} y_j = L \cdot \operatorname{tg} 2\varphi_j \\ y_{j-1} = L \cdot \operatorname{tg} 2(\varphi_j - \Delta\varphi_j) = y_j - \Delta y \end{cases} \quad (5.10)$$

de unde rezultă:

$$\Delta\varphi_j = \varphi_j - \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\operatorname{tg} 2\varphi_j - \frac{\Delta y}{L} \right) \quad (5.11)$$

Observații:

1. Trecerea între două paliere ale curbei φ (asemenea pentru y) nu poate fi făcută cu treceri neracordate, ca în figura 5a, ci trebuie impus un profil al curbei tangent la cele două paliere, de abscise φ_j și φ_{j+1} , pentru intervalul temporal 2τ .

Profilul curbei $\varphi(t)$ pe porțiunea de racord se observă că este convenabil să fie ales:

$$\varphi(t) = \frac{\Delta\varphi_j}{2} \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2\tau} \cdot t - t_j \right); \quad t \in (t_j, t_j + 2\tau) \quad (5.12)$$

2. O problemă aparte o constituie “revenirea” spotului laser în A, din punctul final B, la terminarea scanării. Se observă din figura 5.6 că timpul disponibil pentru acesta este:

$$T_y - t_n = 2\tau + 2t_a + 2\tau \quad (5.13)$$

unde s-au notat:

T_y = perioada funcției $y(t)$;

t_n = timpul de parcurgere a spațiului măsurând după axa Oy (distanța totală baleiată după Oy fiind $y_a - y_{\min} = n \cdot \Delta y$ -rel. (5.8));

$2t_a$ = timpul necesar parcurgerii distanței $2x_a$ = “timpul activ”;

2τ = timpul “de întoarcere” a razei, porțiunea de racord a curbei $x(t)$.

Mișcarea oglinzii scannerului Sc.1 va trebui deci pe acest tronson temporal să se realizeze după legea:

$$\varphi(t) = \frac{\varphi_a + \varphi_n}{2} \cdot \sin \left(\frac{2\pi}{T_y - t_n} \cdot t - \frac{\pi}{4} - t_n \right), \quad t \in (t_n, T_y) \quad (5.14)$$

sau, ținînd seama de (13),

$$\varphi(t) = \frac{\varphi_a + \varphi_n}{2} \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot t}{t_a - 2\tau} - \frac{\pi}{4} - t_n \right), \quad t \in (t_n, T_y) \quad (5.14)'$$

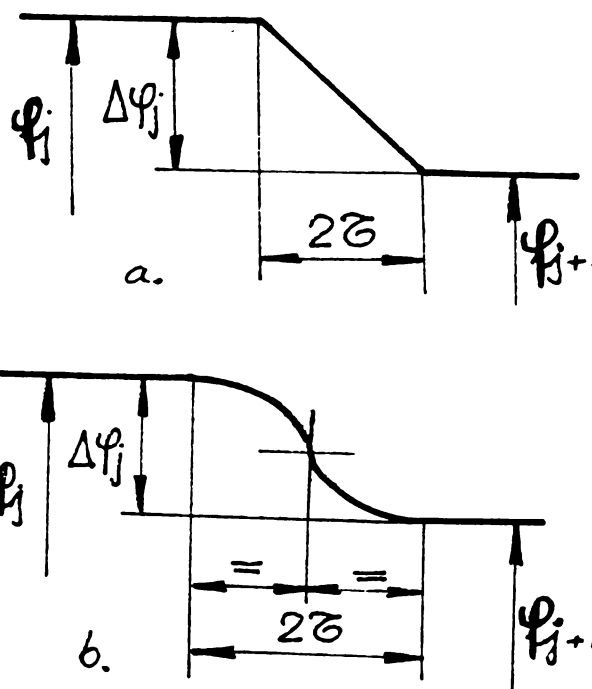


Fig.5.5 Realizarea racordului funcției $\varphi(t)$

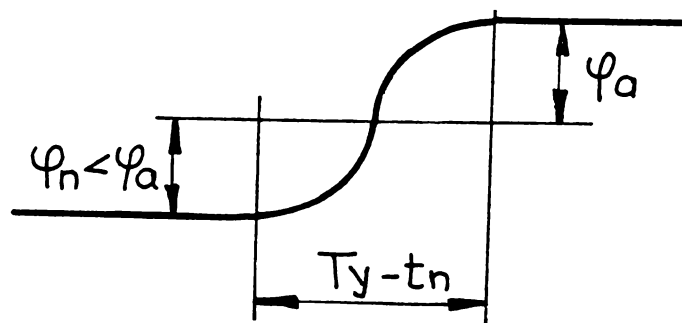


Fig.5.6 Racordul pentru revenirea spotului laser în punctul inițial A la terminarea scanării

unde:
$$\varphi_n = \left| \varphi_s - \sum_{j=1}^n \Delta\varphi_j \right| \quad (5.15)$$

evident, cu $\varphi_n < \varphi_s$

5.2 Scanarea tridimensională (3D)

Determinarea celei de-a treia coordonate (profundimea) în procesul de scanare

În §5.1 s-a realizat determinarea coordonatelor x, y ale unui obiect-probă care se găsește într-un plan xOy situat la distanța $z = L$ de axa de rotație a oglinzii primului scanner (Sc.1) – fig.5.1.

Se pune problema dezvoltării unor soluții cât mai elegante pentru determinarea coordonatei z .

În acest sens se vor lua în considerare, evident, soluțiile cu cost minim, varianta utilizării unui interferometru laser de exemplu, cea care oferă precizia maximă, fiind optimă doar în aplicațiile care justifică o asemenea investiție.

Soluția 1: o constituie utilizarea a încă unui echipament identic cu cel prezentat dar poziționat rectangular față de primul (de exemplu, cu un Sc.1' la distanța $(0, Sc.1') = x$ față de planul yOz).

Această variantă comportă însă următoarele **dezavantaje**:

- echipament dublat, așadar efort, cost, dublu;
- redundanță în determinarea unei coordonate (în exemplul considerat, y , care va fi determinată independent de către ambele sisteme).

Se poate face și observația că cel de-al doilea aspect ar putea constitui, este adevărat, și un **avantaj**, oferind posibilitatea verificării permanente a acurateții procesului de scanare, în cazul sincronizării (prin comandă în paralel) funcționării celor două sisteme.

Soluția 2: Având în vedere dezavantajul major al soluției 1 (echipament, cost),

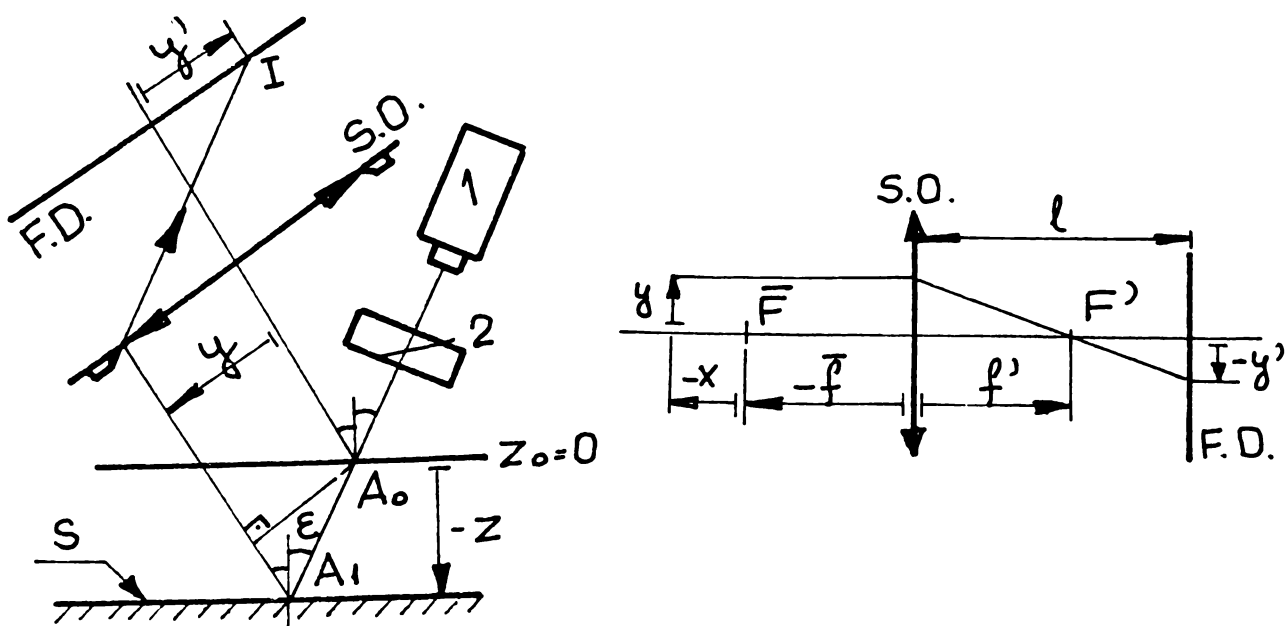


Fig.5.7 Comparator optic cu suprafețe reflectante

se propune în cele ce urmează dezvoltarea unor variante mult mai simple (originale), optime pe categorii de aplicații, așadar specializate, în care echipamentul suplimentar necesar să fie redus la minim, utilizându-se în determinarea celei de-a treia coordonate, z , sistemul de scanare care îl determină pe x și pe y .

-Impunându-se o sensibilitate S a dispozitivului, lungimea necesară a liniei de FD rezultă:

$$L_{FD} = 2S \cdot Z \quad (5.22)$$

Cazul II: $\omega_x \neq 0$ sau/și $\omega_y \neq 0$.

Se poziționează în acest caz pe probă o suprafață albă difuzantă (de tip Lambert - v. Anexa 1).

• **Poziționarea fotodectoarelor**

Considerând S.O. redus la o lentilă subțire, din figura 5.8b:

$$x_0 x'_0 = \bar{f} f' \quad (5.23)$$

și cum: $\bar{f} = f'$, rezultă:

$$l = \frac{f'}{x_0} (x_0 - f') \quad (5.24)$$

• **Coordonatele "obiectului" AB sunt:**

$$\begin{cases} -x = A_0 \bar{F} + A_0 A = -x_0 - A_0 B \cdot \cos(\varepsilon + \theta) \\ -y = AB = A_0 B \cdot \sin(\varepsilon + \theta) \end{cases} \quad (5.25)$$

unde: $A_0 B = -\frac{z}{\cos \varepsilon} \quad (5.26)$

Rezultă:

$$\begin{cases} x = x_0 - z \cdot \frac{\cos(\varepsilon + \theta)}{\cos \varepsilon} \\ y = z \cdot \frac{\sin(\varepsilon + \theta)}{\cos \varepsilon} \end{cases} \quad (5.27)$$

• **Determinarea dimensiunilor petei de lumină pe linia de FD:**

Din relația lui Newton:

$$x' = -\frac{f'^2}{x} \quad (5.28)$$

Din triunghiurile asemenea hașurate în figura 5.8:

$$\frac{d}{D} = \frac{-l + (f' + x')}{f' + x'} \quad (5.29)$$

de unde: $d = \frac{Df'}{x_0} \cdot \frac{x - x_0}{x - f'} \quad (5.30)$

sau, ținând seama de (5):

$$d = \frac{Df'}{x_0} \cdot \frac{z}{\frac{(-x_0 + f') \cos \varepsilon}{\cos(\varepsilon + \theta)} + z} \quad (5.30)'$$

ceea ce constituie caracteristica de funcționare $d(z)$ a aparatului.

• **Determinarea punctului de incidență** a fiecărei raze cu linia FD.

Din $\Delta HID' \sim \Delta EPD'$, se scrie:

$$\frac{-v}{u} = \frac{-ED'}{HD'} \quad (5.31)$$

$$\begin{cases} a = \frac{f'}{x_0} \cdot \frac{z}{\frac{(f' - x_0)\cos\varepsilon}{\cos(\varepsilon + \theta)} + z} = \frac{d}{D} \\ b = \frac{f'}{x_0} \cdot \frac{(f' - x_0) \cdot \operatorname{tg}(\varepsilon + \theta)}{\frac{(f' - x_0)\cos\varepsilon}{\cos(\varepsilon + \theta)} + z} \cdot z = -\frac{d}{D}(f' - x_0)\operatorname{tg}(\varepsilon + \theta) \end{cases} \quad (5.39)$$

Verificare: $d = v\left(\frac{D}{2}\right) - v\left(-\frac{D}{2}\right) = a\left[\frac{D}{2} - \left(-\frac{D}{2}\right)\right] = d$

Convenția de semne este așadar (fig.5.10):

$$d > 0 \Leftrightarrow v\left(\frac{D}{2}\right) > v\left(-\frac{D}{2}\right) \quad (5.40)$$

\Leftrightarrow

$$x'_0 < x' \Leftrightarrow -\frac{f'^2}{x_0} < -\frac{f'^2}{-x} \Leftrightarrow x_0 < x$$

Se observă că:

$$d < 0 \Leftrightarrow v\left(\frac{d}{2}\right) < v\left(-\frac{D}{2}\right) \Leftrightarrow x_0 > x \quad (5.41)$$

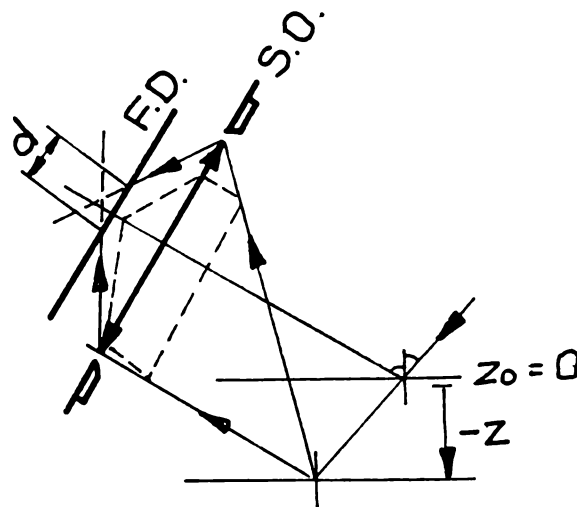


Fig.5.10 Comparatorul optic (cazul $d > 0$)

Partea a III-a

APLICATII ALE TEHNICILOR DE SCANARE

Introducere la Partea a III-a

Această secțiune a lucrării cuprinde o aplicație în care tehnicile de scanare pot juca un rol deosebit. Folosirea lor în analiza sistemelor optice a fost până în prezent mai mult implicită. S-au considerat două situații semnificative:

a) la parcurgerea de către punctul obiect a planului obiect (frontal) – Capitolul 6. Se urmărește în acest caz studiul vignetații fasciculelor de lumină în sisteme optice (S.O.), fenomen esențial în calculul acestora.

Tot la acest punct, păstrând fixă poziția punctului obiect, se pune problema scanării, baleierii cu o rază de lumină (care este necesar a fi colimată, așadar un fascicul laser direcționat este alegerea firească) a planului pupilei de intrare. Se urmărește care din razele incidente pot încă forma imagini în S.O.

S-a definit, pe baza studiului realizat, **coeficientul de vignetație fotometric**, mărime care reușește să surprindă mai bine esența fenomenului fizic decât cele utilizate până în prezent.

b) la parcurgerea (scanarea) de către punctul obiect a axei optice a S.O. – s-au considerat sisteme optice centrate. Acest studiu a dus, conform celor prezentate în Capitolul 7, la introducerea unor noi noțiuni, ca **sisteme optice multipupilare** și mai ales **apertura fotometrică**, mărime fundamentală pentru care **apertura numerică** folosită în prezent constituie doar un caz particular.

Capitolul 6

VIGNETAREA FASCICULELOR DE LUMINĂ ÎN SISTEME OPTICE CENTRATE

6.1. Considerații generale asupra fenomenului de vigneta

6.1.1. Vigneta reprezintă fenomenul de obturare parțială sau totală a fasciculelor de lumină emise de puncte obiect extraaxiale de către diafragmele sistemului optic (S.O.)

Vigneta trebuie considerată în mod obligatoriu în proiectarea oricărui sistem optic, fiind unul din fenomenele care intervin în mod hotărâtor în determinarea calității fotometrice a imaginii obținute.

Principalele fenomene și procese energetice/fotometrice care au loc la parcurgerea mediilor optice de către fasciculele de lumină și care pot influența nivelul, respectiv uniformitatea iluminării (pentru S.O. ce formează imagini reale) sau a luminanței (pentru S.O. vizuale) în planul imagine sunt:

- limitarea fasciculelor de raze prin sistemul de diafragme;
- absorbția în mediile optice;
- reflexiile nedorite pe suprafețele dioptrilor refractanți, respectiv reflexiile incomplete pe suprafețele dioptrilor reflectanți sau parțial reflectanți (cuburi/lame divizoare);
- difuzia asociată transmisiei prin dioptri refractanți (geamurile mate ale dispozitivelor de iluminare, de exemplu), respectiv difuzia prin reflexie pe suprafețe Lambert plane sau curbe (de exemplu, în cazul sferei Ulbricht [N5]).

În continuare discuția se va centra pe primul dintre fenomenele enumerate, prezent și având maximă importanță în cvasimajoritatea sistemelor optice.

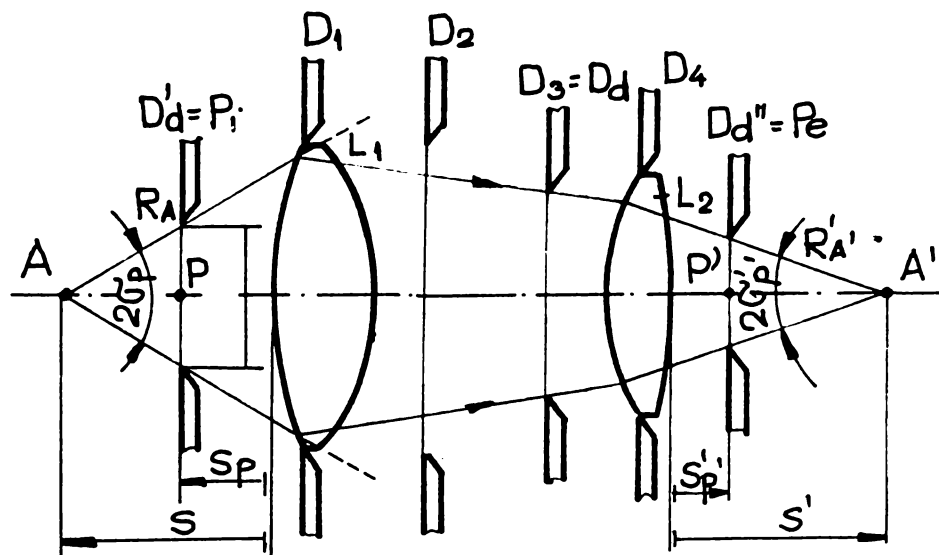


Fig.6.1 Sistemul de diafragme al unui sistem optic centrat

6.1.2. Limitarea fasciculelor de lumină în sistemele optice (S.O.)

Este un proces necesar, realizat în scopul obținerii unor imagini clare și de calitate. Aspectul este esențial în sinteza S.O. din criterii aberaționale [D16, N4].

Limitarea se realizează cu ajutorul **diaframelor**: diafragme propriuzise, monturi ale componentelor optice sau imagini reale ale acestora.

Cele mai importante diafragme pentru un sistem optic sunt:

a. Diafragma de deschidere D_d (de apertură, eficace, activă sau principală): diafragma care se vede sub unghiul cel mai mic (Fig. 6.1) din punctul obiect A. Aceasta limitează deschiderea fascicolului de raze ce pătrund în S.O. și participă la formarea imaginii. În cazul din figura 6.1, $D_d = D_3$.

Pupila de intrare P_i este dată de imaginea lui D_d prin partea lui S.O. anterioară diafragmei: $P_i = D_d'$.

Pupila de ieșire P_e este dată de imaginea lui D_d prin partea lui S.O. posterioară diafragmei $P_e = D_d''$.

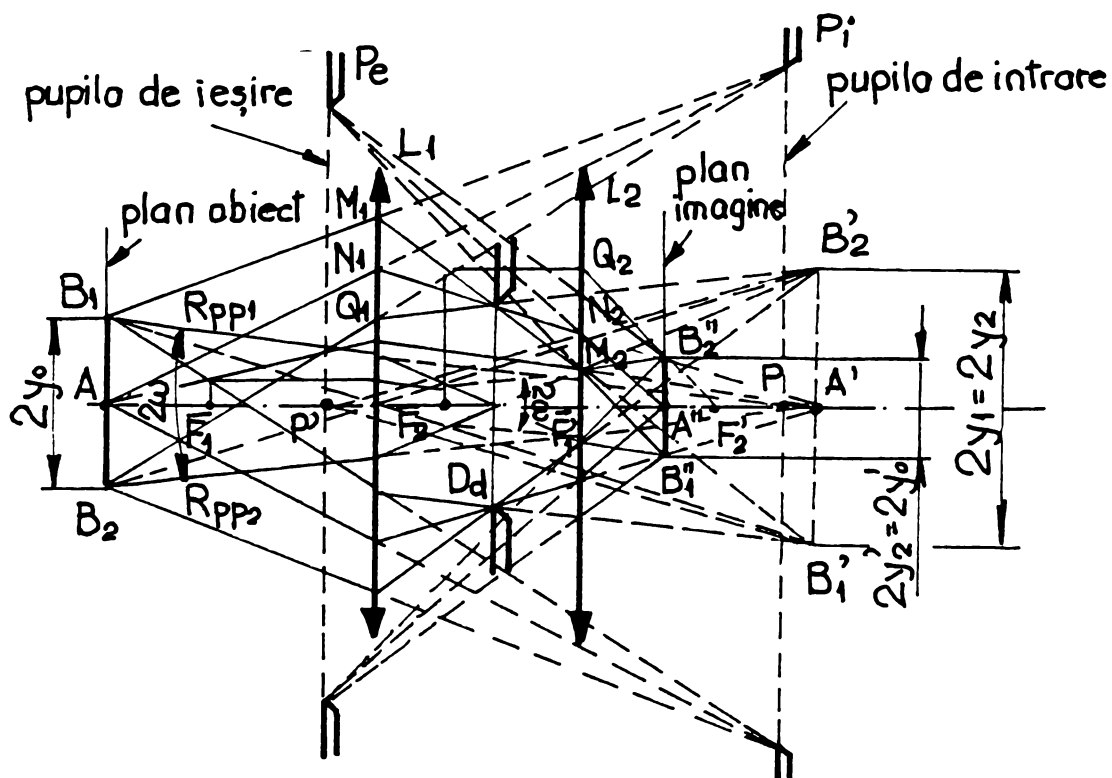


Fig. 6.2 Construcția pupilelor de intrare și ieșire pentru D_d situată între componentele S.O.

Se poate face o discuție amplă [N4, N6] referitoare la **determinarea poziției și deschiderii** P_i și P_e , funcție de poziția și deschiderea D_d . Astfel dacă D_d se află în fața S.O., $P_i = D_d$, iar dacă D_d se află după S.O., $D_d = P_e$. Pentru D_d între componentele S.O., construcția P_i și P_e este exemplificată în figura 6.2, utilizînduse razele caracteristice ale S.O.: R_A = **raza de apertură obiect**, care trece prin A pe la marginea P_i și R_{pp} = **raza pupilară principală**, care trece pe la extremitatea B a câmpului obiect prin centrul D_d și al pupilelor.

Acestea sunt puncte conjugate prin S.O., și poartă numele de **centrele de perspectivă** ale spațiului obiect, respectiv imagine.

Funcție de dispunerea lor, **perspectiva observării spațiului obiect** prin S.O. este diferită: naturală (entocentrică), hipercentrică, sau telecentrică [N6].

Mărimile caracteristice ale D_d sunt :

-**apertura numerică** : pentru obiecte situate pe axa optică (A.O.) la distanțe finite ($s \neq -\infty$) de S.O. (microscopae, retroproiectoare, etc.). Se pot defini :

- **apertura numerică obiect** : $A = n \sin \sigma_p$ (6.1)

- **apertura numerică imagine**: $A' = n' \sin \sigma'_p = \frac{A}{\beta_{ob}}$ (6.2)

unde: n, n' sunt indicii de refracție ai mediului obiect respectiv imagine;

σ_p, σ'_p este unghiul de apertură obiect, respectiv imagine (Fig.6.1);

β_{ob} este mărirea transversală a obiectivului S.O.

-**deschiderea relativă** (Fig.6.3):

$$q = \frac{D}{f'} \quad (6.3)$$

când obiectul se consideră la infinit ($s = -\infty$), de exemplu pentru aparatele foto, telescoape, etc. (D =deschiderea pupilei, iar f' = distanța focală imagine a Ob.).

Pe montura acestor aparate sau a componentelor se marchează uneori **numărul de deschidere**:

$$N = 1/q = f'/D \quad (6.4)$$

b. Diafragma de câmp (D_c), este diafragma a cărei imagini se observă sub unghiul cel mai mic din centrele de perspectivă ale S.O. (centrul P_i , respectiv P_e).

Lucarna de intrare (L_i), respectiv **lucarna de ieșire (L_e)** reprezintă imaginile D_c prin părțile S.O. situate înaintea, respectiv după D_c (în figura 6.1, $D_c = L_i = D_1$).

Rolul lor este de a limita câmpul obiect (pentru L_i), respectiv câmpul imagine (pentru L_e) al S.O. Unghiul sub care se vede L_i din centrul P_i se numește **unghi de câmp vizual obiect (2ω)**, iar, corespunzător, unghiul sub care se vede L_e din centrul P_e se numește **unghi de câmp vizual imagine ($2\omega'$)**.

Unghiurile $2\omega, 2\omega'$ se numesc **câmpuri unghiulare**, iar diametrele lucarnelor **câmpuri liniare** (sau **numere de câmp**).

c. Diafragmele de vignetaire [N4]: sunt cele introduse special în sistem pentru împiedicarea pătrunderii în acesta a unor fascicule de raze ce provin de la puncte obiect situate în afara câmpului dorit al S.O.; de asemenea, pentru împiedicarea formării unor imagini parazite cum sunt cele generate de fascicule reflectate de pereții

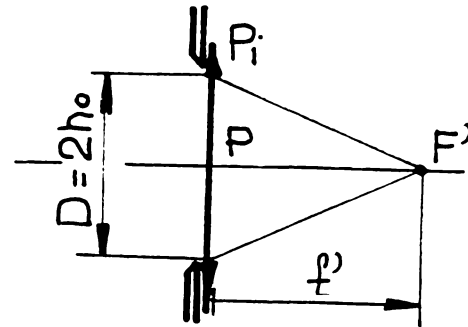


Fig.6.3 Deschiderea relativă pentru S.O. afocale

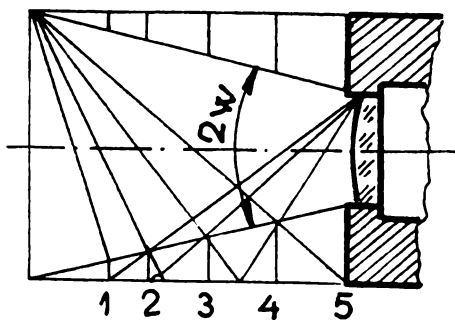


Fig.6.4 Tub parasolar

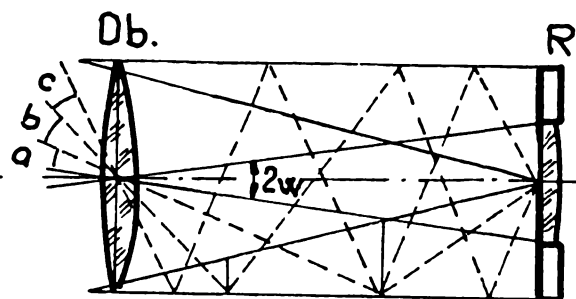


Fig.6.5 Diafragme de vignetaire în interiorul aparatului

interiori ai aparatelor.

Pentru acest ultim scop, de exemplu, două din soluțiile uzitate vizează dispunerea unor asemenea diafragme:

-**în tuburi parasolare** (Fig.6.4), cu lungimea și diametrul alese astfel încât să nu micșoreze câmpul vizual al S.O.

-**în interiorul aparatului:** de exemplu (Fig.6.5), pentru un aparat afocal, între Ob. și reticul (R) se plasează diafragme care să nu obtureze câmpul vizual al aparatului, dar să obtureze razele care prin 1...5 reflexii ar putea ajunge în planul reticulului. Pentru cazul considerat se observă că sunt necesare și suficiente două diafragme poziționate astfel încât să obtureze total razele a,b,c, care prin respectiv una, trei sau cinci reflexii, ar ajunge la reticul.

În afară însă de aceste diafragme introduse anume, practic orice diafragme (vezi de exemplu monturile componentelor sistemului) pot limita suplimentar fasciculele de raze incidente pe S.O. provenind de la obiecte extraaxiale. Se pune așadar stringent problema studiului acestor obturări/vignetări, pentru a determina dacă în planul imagine ajunge un flux luminos suficient pentru a forma imaginea, precum și pentru a determina modul în care este distribuit acest flux în planul imaginii (problema uniformității iluminării, respectiv a clarității imaginii). Ar fi total necorespunzător de a limita fasciculele prea mult, obținând astfel o reducere teoretică substanțială a aberațiilor - deci o imagine excepțională din acest punct de vedere geometric, însă necorespunzătoare fotometric prin aceea că prea puțin din fluxul incident ajunge să participe la formarea imaginii sau prin faptul că centrul imagine ar putea rezulta supraexpus, iar marginile subexpuse (vezi cazul real al unor aparate foto). Acest tip de inconveniente trebuie evitate, iar imaginea trebuie să fie corespunzătoare atât geometric, cât și fotometric. De aceea, analiza ce va urma, aceea a fenomenului vignetării, este absolut obligatorie pentru analiza și sinteza S.O.

6.1.3. Caracterizarea cantitativă a fenomenului de vignetare

Se poate face exprimând **coeficientul de vignetare k** după cum urmează :

a) Ca raportul dintre înălțimea ρ_m a fasciculului de lumină obiect emis de un punct obiect extraaxial și deschiderea $2R_p$ a fasciculului emis de un punct obiect axial, ambele măsurate într-un plan perpendicular pe axa optică (în particular, în planul pupilei de intrare P):

$$k = \rho_m / 2R_p \quad (6.5)$$

b) Ca raportul dintre aria S_p a suprafeței petei de lumină produsă de fasciculul de lumină emis de un punct extraaxial și aria petei de lumină produsă de fasciculul emis de un punct axial în planul pupilei de intrare:

$$k = \frac{S_p}{\pi R_p^2} \quad (6.6)$$

unde $S_p = \text{aria}(M_p F_p N_p H_p) - v$. Fig.6.6.

c) Ca raportul dintre fluxul Φ emis de un punct obiect extraaxial și fluxul Φ_A emis de un punct obiect axial A prin sistemul imaginilor diaframelor S.O.:

$$k = \Phi / \Phi_A \quad (6.7)$$

d) În cadrul proiectării asistate pe calculator (CAD) a S.O., este convenabil să se procedeze la realizarea unei rețele pe suprafața pupilei de intrare. Pentru o pupilă

circulară (cazul cel mai des întâlnit), se realizează o rețea din cercuri concentrice și raze. Se procedează la drumuirea trigonometrică pentru puncte obiect semnificative considerând fasciculul de raze cu originea în punctul obiect, celalalt punct definatoriu pentru rază fiind unul din nodurile rețelei.

Se poate defini astfel coeficientul de vignetație k prin raportul dintre numărul de raze emergente N_e din S.O. și numărul de raze incidente N_i pe S.O. de la un anumit punct obiect ($N_i =$ numărul nodurilor rețelei):

$$k = N_e / N_i \quad (6.8)$$

Practic acest mod de exprimare este asemănător cu cel dat de definiția (b), deoarece se face raportul a două suprafețe “discretizate”.

Abordarea aceasta este deosebit de practică, deoarece ține seama de mersul real al razelor de lumină prin S.O., fără a mai fi introdusă ipoteza puternic simplificatoare a unui S.O. ideal pe porțiuni, ipoteză utilă dar care nu reflectă întru totul realitatea fizică, mai ales în cazul unor S.O. cu unghiuri de câmp obiect mari (de exemplu obiective superangulare). În acest caz coeficientul de vignetație se calculează simultan cu aberațiile. În cazul în care k rezultă cu o valoare inacceptabil de mică (uzual se impune $k_{\min} = 50\%$), procesul trebuie reluat. Un dezavantaj al acestei modalități de caracterizare a vignetației este că ține seama doar în mod indirect de aspectele fotometrice surprinse mult mai bine de definiția (c).

În literatura de specialitate cea mai utilizată este definiția (a), fiind mai comodă deși, după cum se va vedea, aceasta modelează cel mai puțin precis fenomenul fizic. Definiția (b) este mai puțin uzitată, cel puțin în calculele analitice, pe când definiția (c) este mai degrabă sugerată decât tratată în literatură, deși este cea care surprinde cel mai bine esența fenomenului fizic și de aceea este modalitatea de abordare pe care se va insista cel mai mult în cele ce urmează. În acest sens analiza realizată în acest capitol, bazată pe direcții de cercetare semnalizate ca posibile în literatura de specialitate, însă netratate analitic constituie o dezvoltare originală realizată în domeniul studiului vignetației.

Toate metodele, dar în special cele legate de definiția (d), beneficiază de aportul scanării ca metodă obligatorie de studiu, atât în calculul computerizat, cât și în determinările experimentale, datorită necesității de a **parcure**, pentru a-l determina pe k , un anumit plan (în general, al pupilei de intrare P_i) cu raza incidentă, urmărindu-se traiectul razei emergente, respectiv intersecția acesteia cu un anumit plan imagine (în general, al pupilei de ieșire P_e).

6.2. Cercuri de obscurizare în planul de front

În cele ce urmează se va considera situația în care vignetația este produsă strict de diafragma de apertură și de diafragma de câmp (în spațiul obiect, de pupila, respectiv de lucarna de intrare).

a. Obiect situat la distanță finită de S.O. ($s \neq -\infty$) - Fig 6.6

Fie $\pi_f = xAy$ - planul de front obiect al S.O., unde $\{A\} = A.O. \cap \pi_f$ iar $P(s_p, R_p)$ și $L(s_L, R_L)$ sunt pupila, respectiv lucarna de intrare a S.O. (A.O. = axa optică a S.O.).

Locul geometric al punctelor obiect $B \in \pi_f$ care emit prin pupila de intrare P fascicule de lumină neobturate de lucarna de intrare L (deci nici de alte diafragme ale

S.O.) este, din motive de simetrie, discul $D(A, r_1) \subset \pi_f$.

Cercul $C(A, r_1)$ se numește **cerc de obscurizare zero**, denumire ce subliniază faptul că nici o altă diafragmă a S.O. în afara pupilei de intrare nu obturează/vignetează fasciculele emise din $B \in D(A, r_1)$. Este de remarcat însă că, datorită înclinării diferite a fasciculelor emise de suprafețe elementare construite în jurul unor puncte $B(r)$ diferite, fluxul luminos primit de S.O. de la fiecare "punct" obiect este diferit, chiar în cazul unui plan obiect cu proprietăți fotometrice identice în fiecare punct.

Din figura 6.6, coordonata punctului $B_1 \in C(A, r_1)$ rezultă :

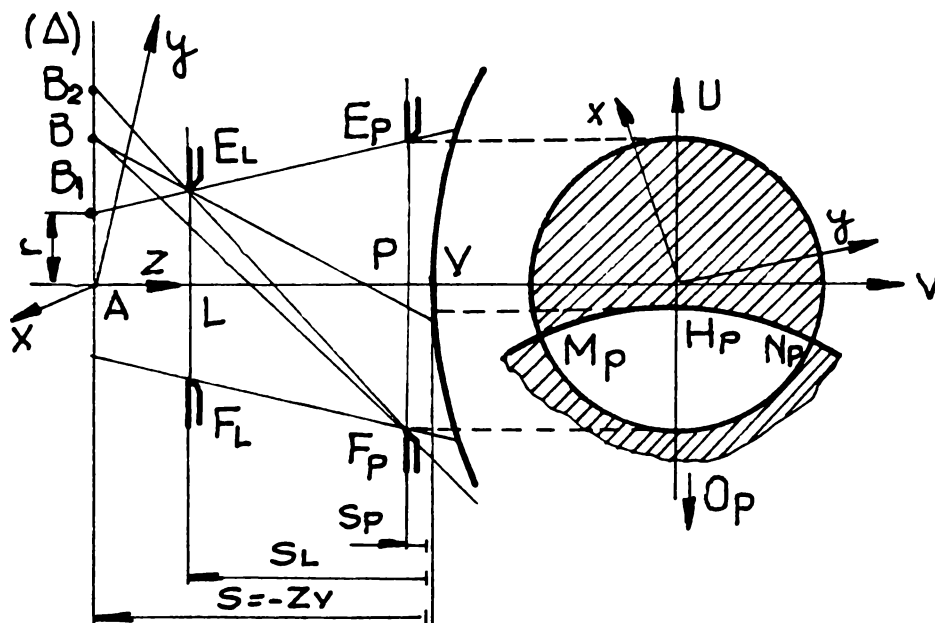


Fig.6.6 Pata de lumină în planul pupilei de intrare pentru $s \neq \infty$

$$r_1 = \frac{s_p R_L - s_L R_p}{s_p - s_L} + s \frac{R_p - R_L}{s_p - s_L} = \frac{z_p R_L - z_L R_p}{z_p - z_L} \quad (6.9)$$

unde s-a utilizat pentru simplitate și sistemul $Axyz$, în care $z_A = 0$.

Locul geometric al punctelor-obiect $B \in \pi_f$ care încă pot forma imagini prin S.O. (adică locul geometric al punctelor B care emit cel puțin o rază de lumină ce ajunge pe suprafața primului dioptru al S.O.) este, tot din considerente de simetrie, discul $D(A, r_2) \in \pi_f$. Cercul $C(A, r_2)$ se numește **cerc de obscurizare totală**.

Din figura 6.6, rezultă :

$$r_2 = \frac{s_p R_L - s_L R_p}{s_p - s_L} - s \frac{R_p - R_L}{s_p - s_L} = \frac{z_p R_L - z_L R_p}{z_p - z_L} \quad (6.10)$$

Inelul punctelor-obiect $B \in \pi_f$ ce emit prin P fascicule de lumină parțial obturate de L este $D(A, r_2) - D(A, r_1)$, caracterizat de :

$$\|B_1 B_2\| = 2 \frac{s_L - s}{s_p - s_L} R_p \quad (6.11)$$

b. Obiect situat la infinit ($s = -\infty$) :

Fasciculul de lumină obiect, paralel, este caracterizat în acest caz de unghiul α (Fig.6.7). Se observă că:

-pentru $\alpha \in [-\alpha_1, \alpha_1]$, cu :

$$\alpha_1 = \arctg \frac{R_L - R_p}{d} \quad (6.12)$$

fasciculul obiect emis prin lucarna L trece neobturat prin pupila P. Unghiul α_1 definește **câmpul de plină lumină al S.O.**

- pentru $\alpha \in [-\alpha_2, \alpha_1] \cup [\alpha_1, \alpha_2]$ cu :

$$\alpha_2 = \text{arctg} \frac{R_L + R_p}{s_p - s_l} \tag{6.13}$$

fasciculul obiect emis prin lucarnă este parțial obturat de pupilă. Razele de lumină obiect caracterizate de $|\alpha| > \alpha_2$ nu ajung în S.O.

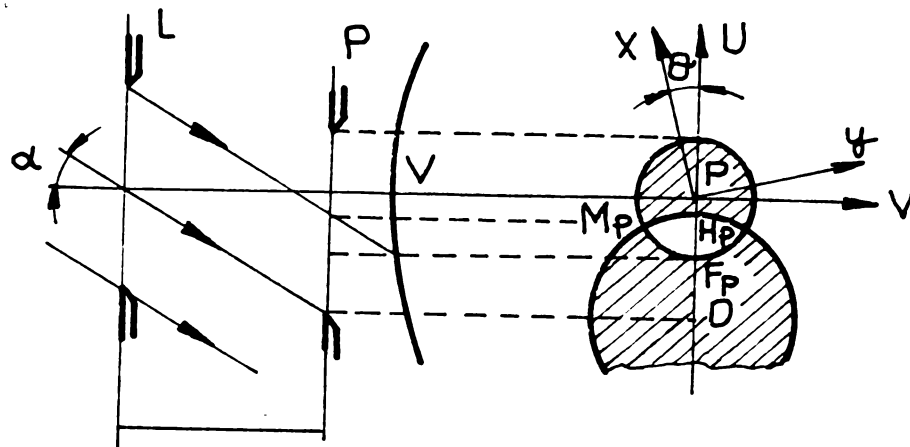


Fig.6.7 Pata de lumină în planul pupilei de intrare pentru $s = -\infty$

Se poate spune, prin analogie formală cu definițiile prezentate în cazul planului obiect situat la distanță finită, că există la $s = -\infty$ un **cerc de obscurizare zero**, dat de intersecția dintre planul de la $s = -\infty$ și conul cu unghiul la vârf $2\alpha_2$, baza cercul $C_L(L, R_L)$ și vârful de ordonată (fig.6.8):

$$s_{(1)} = \frac{s_p R_L - s_l R_p}{R_L - R_p} \tag{6.14}$$

$$s_{(2)} = \frac{s_p R_L + s_l R_p}{R_L - R_p} \tag{6.15}$$

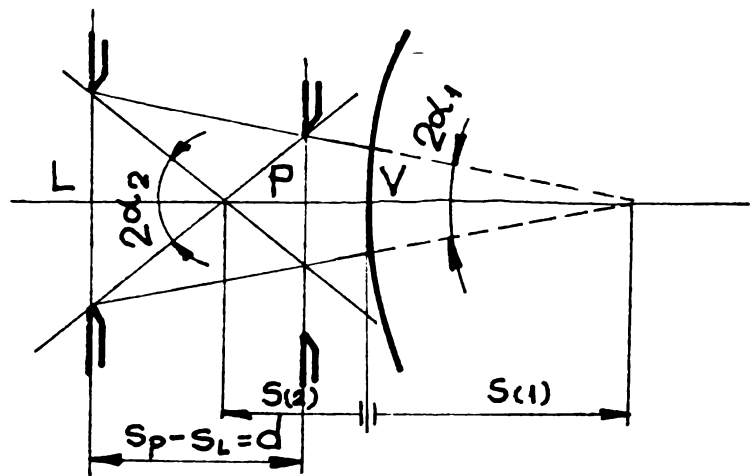


Fig.6.8 Cercuri de obscurizare pentru $s = -\infty$

Tot prin analogie, se poate afirma că există la $s = -\infty$ un **cerc de obscurizare 100%**, dat de intersecția dintre planul de la $s = -\infty$ și conul cu unghiul la vârf $2\alpha_2$, baza cercul $C_L(L, R_L)$ și vârful conului de ordonată (fig.6.8).

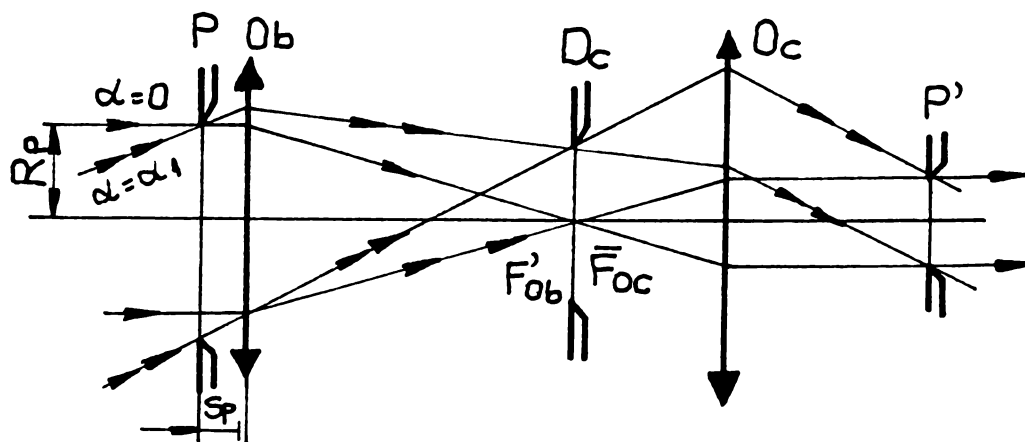


Fig.6.9 Cazul diafragmei de câmp situată în planul F'_{ob}

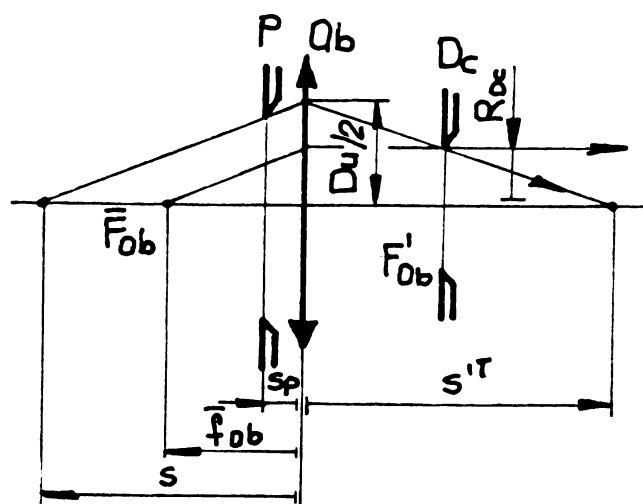
Observație :

În cazul în care diafragma de câmp D_c este poziționată în planul focal imagine al primului subansamblu al S.O.(Fig.6.9), lucarna L este proiectată la $-\infty$.

În consecință, S.O. va fi caracterizat doar de câmpul de plină lumină, ceea ce face ca obiectele observate să aibă un contur clar, acesta fiind de fapt unul din dezideratele realizării aparatelor de observare (cazul lunetelor).

Din formula lentilelor subțiri pentru obiectivul lunetei (fig.6.10), se obține :

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'} \quad (6.16)$$



ținând seama că din figura 6.10:

Fig.6.10 Deschiderea D_c pentru obiectivele S.O. afocale

$$\begin{cases} s = s_p + R_p \operatorname{ctg} \alpha_1 \\ s' = \frac{R_{Dc} f'}{D_u} \\ D_u = R_p + s_p \operatorname{tg} \alpha_1 \end{cases} \quad (6.17)$$

unde D_u = diametrul util al obiectivului. De aici rezultă raza R_{Dc} a diafragmei de câmp:

$$R_{Dc} = \frac{(R_p + s_p \operatorname{tg} \alpha_1)^2}{R_p + (s_p + f') \operatorname{tg} \alpha_1} \quad (6.18)$$

În cazul particular în care montura obiectivului este și pupilă de intrare, adică $s_p \cong 0$, raza diafragmei de câmp devine:

$$R_{Dc} = \frac{R_p^2}{R_p + f' \operatorname{tg} \alpha_1} \quad (6.19)$$

6.3. Studiul petei de lumină în planul pupilei de intrare

a. Obiect situat la distanță finită ($s \neq -\infty$)

Pentru $B \in D(A, r_1)$ - pata de lumină în planul pupilei este chiar discul $D(P, R_p)$ (fig.6.6).

Pentru $B \in D(A, r_2) \setminus D(A, r_1)$ - pata de lumină în planul pupilei (fig.6.6) este dată de suprafața $M_p H_p N_p F_p = D(P, R_p) \cap D(C_p, \|C_p H_p\|)$, unde $C(C_p, \|C_p H_p\|)$ este cercul obținut prin omotetia cercului $C(L, R_L)$ ce marchează conturul lucarnei de intrare în planul pupilei (P).

Așadar $\{C_p\} = BL \cap P$ și $\{H_p\} = BE_L \cap P$ și rezultă poziția centrului C_p :

$$r_{C_p} = (z_p - z_L) \frac{r}{z_L} \quad (6.20)$$

Raza cercului $C(C_p, \|C_p H_p\|)$ rezultă:

$$\|C_p H_p\| = r_{H_p} - r_{C_p} = \frac{z_p}{z_L} R_L > R_p \quad (6.21)$$

Coordonatele celorlalte două puncte caracteristice, M_p ; N_p se obțin punând condiția:

$$C(P, R_p) \cap C(C_p, \|C_p H_p\|) = \{M_p, N_p\}$$

Este convenabil să se lucreze în continuare în sistemul de coordonate Auvz (Fig.6.6), cu $Au = \Delta$. Din:

$$\begin{cases} C(P, R_p): u^2 + v^2 = R_p^2 \\ C(C_p, \|C_p H_p\|): (u - r_{C_p})^2 + v^2 = \|C_p H_p\|^2 \end{cases} \quad (6.22)$$

ținând seama de relațiile (6.20) și (6.21), rezultă coordonatele punctelor N_p , respectiv M_p în sistemul Auvz:

$$\begin{cases} u = \frac{z_p - z_L}{2z_L} \left[\frac{r_1 r_2}{r} - r \right] \\ v = \pm \frac{z_p - z_L}{2z_L} \frac{\sqrt{(r^2 - r_1^2)(r_2^2 - r^2)}}{r} \end{cases} \quad (6.23)$$

În figura 6.11 sunt prezentate graficele funcțiilor $u(r)$ și $|v|(r)$.

Într-un sistem de coordonate cilindrice $Ar\theta z$, notând:

$$(M_p \hat{P} H_p) = (H_p \hat{P} N_p) =: \theta_p = \arccos \frac{-u}{R_p} \quad (6.24)$$

rezultă:

$$\begin{cases} M_p(R_p, \theta_{M_p}, z_p) \\ N_p(R_p, \theta_{N_p}, z_p) \end{cases} \quad \text{cu} \quad \begin{cases} \theta_{M_p} = \pi + \theta + \theta_p \\ \theta_{N_p} = \pi + \theta - \theta_p \end{cases} \quad (6.25)$$

Aria suprafeței petei de lumină în planul pupilei de intrare P are expresia:

$$S_p = \frac{1}{2} \left[M_p \hat{F}_p N_p \cdot R_p - \|M_p N_p\| \|PO\| + M_p \hat{H}_p N_p \|C_p H_p\| - \|M_p N_p\| \|C_p O\| \right] \quad (6.26)$$

Din figura 6.12:

$$\begin{cases} M_p \hat{F}_p N_p = 2R_p \theta_p \\ M_p \hat{H}_p N_p = 2 \frac{z_p}{z_L} R_L \varphi_p \\ \varphi_p = \arcsin \frac{z_L |v|}{z_p R_L} \end{cases} \quad (6.27)$$

unde θ_p este dat de relația (6.24).

Înlocuind relația (6.27) în (6.26),

rezultă:

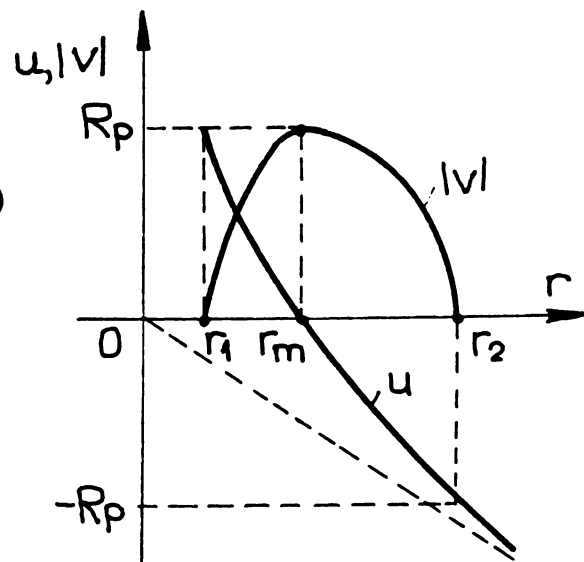


Fig.6.11 Graficele $u(r)$ și $|v|(r)$ pentru $s \neq \infty$

$$S_p = R_p^2 \arccos \frac{-u}{R_p} + \frac{z_p^2}{z_L^2} R_L^2 \arcsin \left(\frac{z_L |v|}{z_p R_L} \right) - \frac{z_p - z_L}{z_L} r |v| \quad (6.28)$$

În figura 6.13 este reprezentat graficul funcției $S_p(r)$.

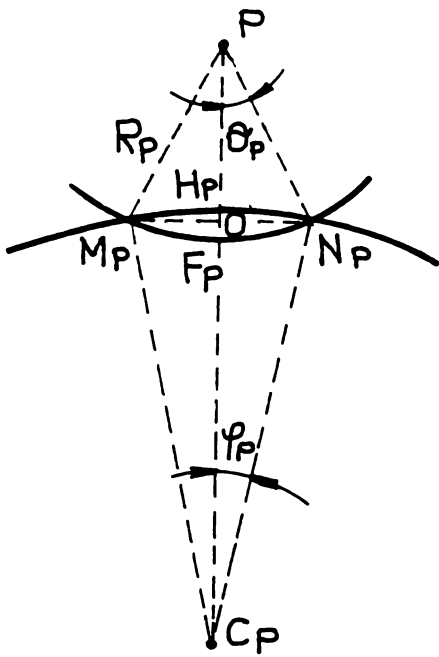


Fig. 6.12 Intersecția cercurilor obținute prin omotetie în planul P_i

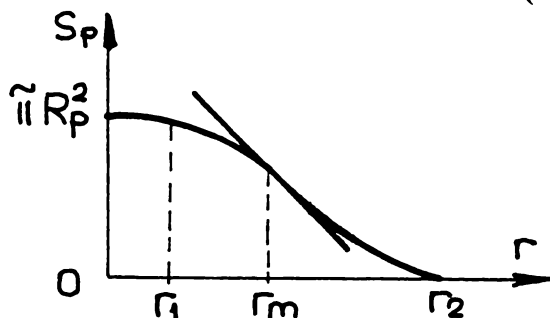


Fig. 6.13 Graficul funcției S_p(r)

Discuție:

Pentru poziții diferite ale punctului obiect B pe semidreapta $\Delta \in \pi_i$, se realizează o deplasare, respectiv o variație a dimensiunii spotului luminos produs în planul pupilei de intrare P, corespunzătoare situațiilor caracteristice reprezentate în figura 6.14. Aceasta deoarece, cu creșterea lui r, depărtarea față de A.O. a centrului cercului C_L care reprezintă proiecția lucarnei de intrare L în planul pupilei de intrare P crește direct proporțional cu r - relația (6.20), în timp ce raza cercului C_L rămâne constantă - relația (6.21).

În consecință, pentru $r = 0$, cercurile C_p și C_L sunt concentrice. Pentru $r = r_1$ devin tangente, iar pentru $r \in (r_1, r_2)$, C_L și C_p sunt secante (fig.6.14).

Din studiul grafic al funcției u(r) -figura 6.20- se observă ca $u(r_1) = R_p$, în timp ce $u(r_m) = 0$ (cercurile se intersectează pe A.O.), unde $r_m = \sqrt{r_1 r_2}$.

Evident, pentru această valoare a lui r, abscisa v a punctului de intersecție își atinge maximum: $v(r_m) = R_p$ - figura 6.20. Pentru $r = r_2$, rezultă $u = -R_p$ și $v = 0$, iar cercurile sunt tangente exterior (fig.6.14).

Aria suprafeței petei de lumină este egală (fig.6.13) cu πR_p^2 pentru $r \in (0, r_1)$, respectiv este dată de relația (6.28) pentru

$r \in (r_1, r_2)$. Se observă că în acest caz aria este descrescătoare, punctul de abscisă r_m constituind un punct de inflexiune pentru graficul funcției S_p, iar $S_p = 0, \forall r > r_2$, adică nici un punct $B \in D(A, r_2)$ nu formează imagini prin S.O.

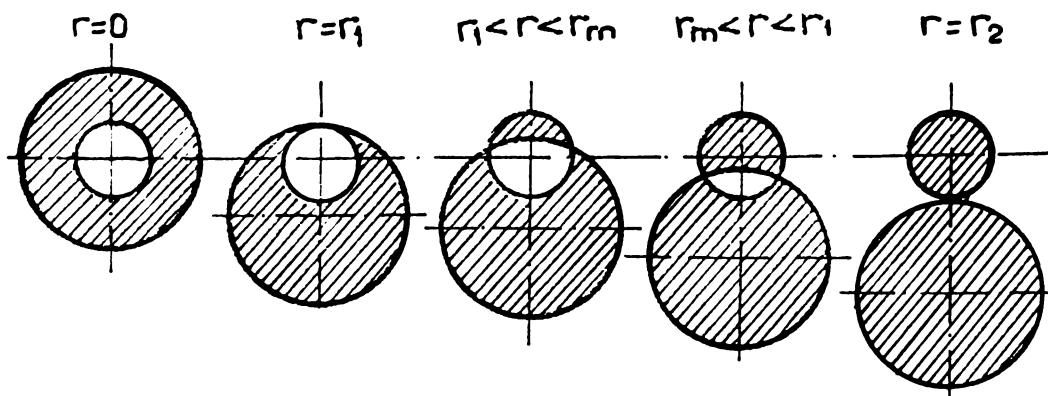


Fig. 6.14 Poziția relativă a cercurilor obținute prin omotetie în planul P_i

b. Obiect situat la infinit (s = -∞) - figura 6.7.

Lucarna de intrare este proiectată în planul de intrare sub forma unui disc D (C_p, ||C_pH_p||), având coordonata centrului: $r_{C_p} = -d \cdot \text{tg} \alpha$, și raza ||C_pH_p|| = R_p, unde s-a notat, pentru simplitate, cu d distanța dintre pupila și lucarna de intrare (fig.6.7).

Punctele M_p și N_p de intersecție a celor două cercuri: $C(P, R_p)$, respectiv $C(C_p, H_p)$, în planul P au coordonatele date de:

$$\begin{cases} u^2 + v^2 = R_p^2 \\ (u - r_{C_p})^2 + v^2 = R_L^2 \end{cases} \quad (6.29)$$

de unde rezultă:

$$\begin{cases} u = -\frac{d^2 \operatorname{tg}^2 \alpha - (R_L^2 - R_p^2)}{2d \operatorname{tg} \alpha} \\ v = \pm \frac{\sqrt{[d^2 \operatorname{tg}^2 \alpha - (R_L - R_p)^2][(R_L - R_p)^2 - d^2 \operatorname{tg}^2 \alpha]}}{2d \operatorname{tg} \alpha} \end{cases} \quad (6.30)$$

În figura 6.15 sunt prezentate graficele funcțiilor $u(\alpha)$ și $|v|(\alpha)$, unde $u = 0$ pentru:

$$\alpha_m = \operatorname{arctg} \sqrt{\operatorname{tg} \alpha_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_2} \quad (6.31)$$

iar $\frac{d^2 u}{d\alpha^2} = 0$ (punct de inflexiune) pentru:

$$\alpha_i = \operatorname{arctg} \sqrt{\operatorname{tg} \alpha_m} \quad (6.32)$$

Aria suprafeței petei de lumină în planul de intrare are expresia (6.26), unde în acest caz $\|C_p H_p\| = R_L$. Deoarece:

$$\begin{cases} M_p \hat{I}_p N_p = 2R_p \cdot \arccos \frac{-u}{R_p} \\ M_p \hat{H}_p N_p = 2R_L \cdot \arcsin \frac{|v|}{R_L} \end{cases} \quad (6.33)$$

și cum $\|C_p P\| = \Gamma_{C_p}$, rezultă aria suprafeței petei:

$$S_p = R_p^2 \arccos \frac{-u}{R_p} + \frac{z_p^2}{z_L^2} R_L^2 \arcsin \frac{|v|}{R_L} - |v| \cdot d \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (6.34)$$

Concluzie: Analiza acestui caz este perfect analoagă cu cea din cazul obiectului situat la distanța finită de S.O. Figura 6.14 este valabilă și în acest caz, deoarece $R_L > R_p$; se consideră însă, evident, peste tot, α în loc de r .

6.4. Coeficientul de vignetaie geometric

a. Obiect situat la distanță finită ($s \neq -\infty$)

Utilizând definiția (a) - relația (6.5) - și ținând seama de figura 6.6, coeficientul de vignetaie are în acest caz expresia:

$$k = \frac{z_p - z_L}{2z_L R_p} (r_2 - r) \quad (6.35)$$

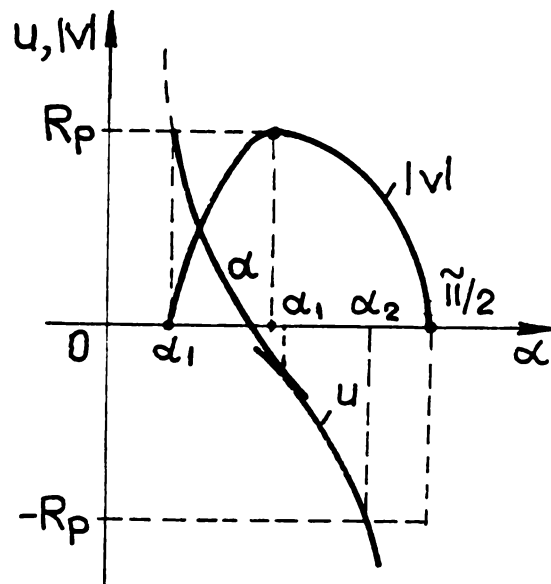


Fig. 6.15 Graficele funcțiilor $u(\alpha)$, $|v|(\alpha)$ pentru $s = -\infty$

funcție a cărei grafic (fig.6.16) justifică definirea uzuală a cercului de obscurizare 50% la jumătatea distanței dintre cercurile de obscurizare 0% și 100%.

Modelarea fenomenului fizic cu acest mod de definire a coeficientului k este însă nesatisfăcătoare (liniaritatea caracteristicii este avantajoasă din punct de vedere al ușurinței de operare, dar fenomenul este evident departe de a fi liniar) și de aceea se apelează la definiția (b) - relația (6.6), în care, introducându-se expresia (6.28) a ariei suprafeței petei de lumină în planul pupilei de intrare, rezultă:

$$k = \frac{1}{\pi} \left[\arccos \frac{-u}{R_p} + \frac{z_p^2}{z_L^2} \cdot \frac{R_L^2}{R_p^2} \arcsin \left(\frac{z_L}{z_p} \frac{|v|}{R_L} \right) - \frac{z_p - z_L}{z_L R_p^2} r |v| \right] \quad (6.36)$$

Se observă că această funcție $k(r)$, a cărei grafic este prezentat în figura 6.17, modelează mult mai exact fenomenul fizic. Totuși, palierul care există pentru $r \in [0, r_1]$ nu corespunde realității fizice: curba $k(r)$ ar trebui să fie netedă. Acest deziderat este atins prin definirea coeficientului de vignetaie fotometric (v. §6.5).

b. Obiect situat la infinit ($s = -\infty$)

În această situație prezintă interes doar coeficientul de vignetaie dat de definiția (b). Din relațiile (6.6) și (6.34), expresia lui k devine:

$$k = \frac{1}{\pi} \left[\arccos \frac{-u}{R_p} + \frac{R_L^2}{R_p^2} \arcsin \frac{|v|}{R_L} - \frac{|v|}{R_p^2} d \cdot \operatorname{tg} \alpha \right] \quad (6.37)$$

Alura graficului funcției $k(\alpha)$ este aceeași cu a graficului funcției $k(r)$ - figura 6.17 -, evident, înlocuind r cu α și cu observația ca abscisa punctului de inflexiune are în acest caz o expresie mult mai complicată.

6.5. Coeficientul de vignetaie fotometric

În §6.2 s-au pus în evidență trei zone caracteristice în planul de front π_f al unui S.O. centrat și s-au dedus razele celor două cercuri caracteristice, de obscurizare 0% și respectiv de obscurizare 100%.

S-a făcut de asemenea observația că denumirea cercului de obscurizare 0% este oarecum improprie, ea semnificând faptul că, pentru punctele din π_f aparținând discului mărginit de acest cerc, fasciculele de lumină sunt obturate doar de pupila de intrare P. Dată fiind înclinarea fasciculelor de lumină însă, chiar considerând o suprafață emitentă ideală, de tip perfect difuzant (Lambert), cu toate punctele având aceleași proprietăți de emitanță energetică, cantitatea de lumină care ajunge de la fiecare punct la primul dioptru al S.O. este diferită.

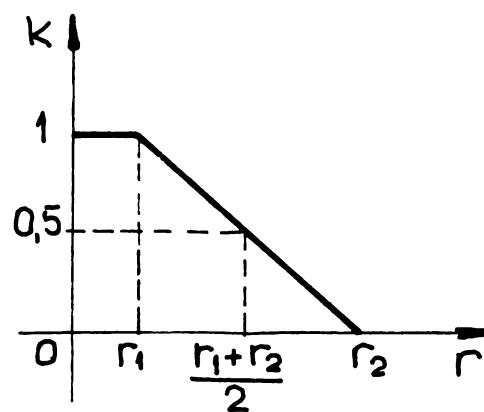


Fig.6.16 Graficul coeficientului de vignetaie geometric liniar pentru $s \neq -\infty$

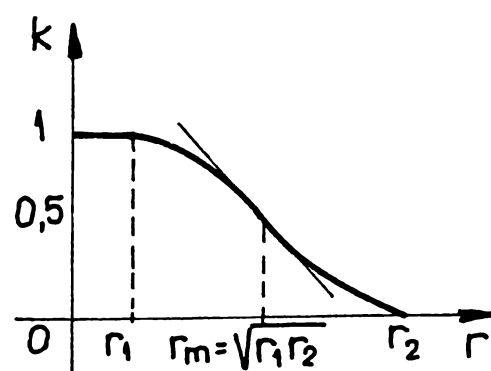


Fig.6.17 Coeficientul de vignetaie geometric neliniar pentru $s = -\infty$

Este necesară, pentru rezolvarea riguroasă a problemei, caracterizarea energetică a planului π_f , adică deducerea unei funcții care să compare aportul energetic al fiecărui punct al π_f la fasciculul de lumină incident pe primul dioptru al S.O. Această funcție căutată reprezintă chiar coeficientul de vignetaie fotometric al S.O.

Pentru deducerea sa, se adoptă următoarea **ipoteză de lucru**: suprafața planului de front este o suprafață albă difuzantă și toate punctele sale au aceeași intensitate maximă I_m după direcția normalei -v. Anexa 1.

Această ipoteză permite, având în vedere ca s-a fixat și un mediu obiect nedispersiv, omogen și perfect transparent, tratarea în mod izolat a influenței sistemului diaframelor asupra caracteristicilor energetice ale fasciculelor de lumină incidente pe S.O.

Discuție: Pentru a determina funcția căutată, se prefigurează următoarele metode:

m1. Calculul fluxului de lumină emis de un punct $B(0, r, \theta) \in \pi_f$ după un segment de sferă cu vârful în B și mărginit de conul fasciculului de lumină determinat la §6.2; (calculul conform §A1.3).

m2. Calculul fluxului de lumină emis de $B \in \pi_f$, flux calculat prin suprafața pupilei de intrare P_i ;

m3. Calculul fluxului de lumină emis de $B \in \pi_f$ considerînd iluminarea produsă pe suprafața primului dioptru al S.O.

În cele ce urmează, datorită simplității exprimării matematice a calculului, se va lucra cu metoda a doua dintre cele enumerate mai sus.

a. Obiect plan de front situat la distanță finită ($s \neq -\infty$)

Se va considera doar situația în care diafragma de câmp este poziționată în planul focal imagine al primului subsistem optic al S.O. prin urmare lucarna de intrare este proiectată la $-\infty$. Vignetaia fasciculelor de lumină incidente este deci realizată numai de către pupila de intrare.

$$\text{Fie } B_p = \text{pr}_p B. \text{ Notatii: } \alpha = \angle E_p B_p Q; \theta - \theta_B = \gamma; \|PB_p\| = r = \sqrt{x_B^2 + y_B^2} \quad (6.38)$$

Considerînd obiectul plan frontal o suprafață albă difuzantă, fluxul de lumină emis de suprafața elementară din B are expresia:

$$\Phi = I_m \int_{\alpha=0}^{2\pi} \int_0^{\varphi} \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi \cdot d\alpha \quad (6.39)$$

În acest caz, după cum se observă din fig.6.18, $\varphi = \varphi(\alpha)$, așadar, efectuînd calculele:

$$\Phi = \frac{I_m}{2} \int_{\alpha=0}^{2\pi} \sin^2 \varphi(\alpha) \cdot d\alpha \quad (6.40)$$

Din triunghiul BB_pQ , rezultă:

$$\text{tg } \alpha = \|B_pQ\| / z_p \quad (6.41)$$

Din triunghiul PB_pQ , aplicînd teorema sinusurilor, se obține:

$$\frac{\|B_pQ\|}{\sin \gamma} = \frac{r}{\sin(\alpha - \gamma)} = \frac{R_p}{\sin \alpha} \quad (6.42)$$

de unde, efectuînd calculele, rezultă:

$$\|B_p Q\| = \sqrt{R_p^2 - r^2 \sin^2 \alpha} - r \cos \alpha \quad (6.43)$$

Făcând succesiv înlocuirile în (6.40), rezultă:

$$\phi = \frac{I_m}{2} \int_{\alpha=0}^{2\pi} \frac{\left(\sqrt{R_p^2 - r^2 \sin^2 \alpha} - r \cos \alpha\right)^2}{z_p^2 + \left(\sqrt{R_p^2 - r^2 \sin^2 \alpha} - r \cos \alpha\right)^2} d\alpha \quad (6.44)$$

Efectuând calculele rezultă că, pentru $r \in [0, r_1]$, fluxul emis de o suprafață elementară constituită în jurul lui B este:

$$\phi = \frac{\pi I_m}{2} \left[1 - \frac{z_p^2 - R_p^2 + r^2}{\sqrt{z_p^2 + (R_p - r)^2} \sqrt{z_p^2 + (R_p + r)^2}} \right] \quad (6.45)$$

Concluzie: Obținând cu ajutorul definiției (c) expresia coeficientului de vignetaie fotometric -rel. (6.7) și trasând graficul funcției $k(r)$ obținute, se observă că alura acestuia este analoagă celei prezentate în figura 6.17, cu observația că palierul existent pentru coeficientul de vignetaie geometric pentru $r \in [0, r_1]$ nu mai există în acest caz: curba care se obține pentru coeficientul fotometric este netedă, așadar fenomenul fizic este în fine modelat corespunzător.

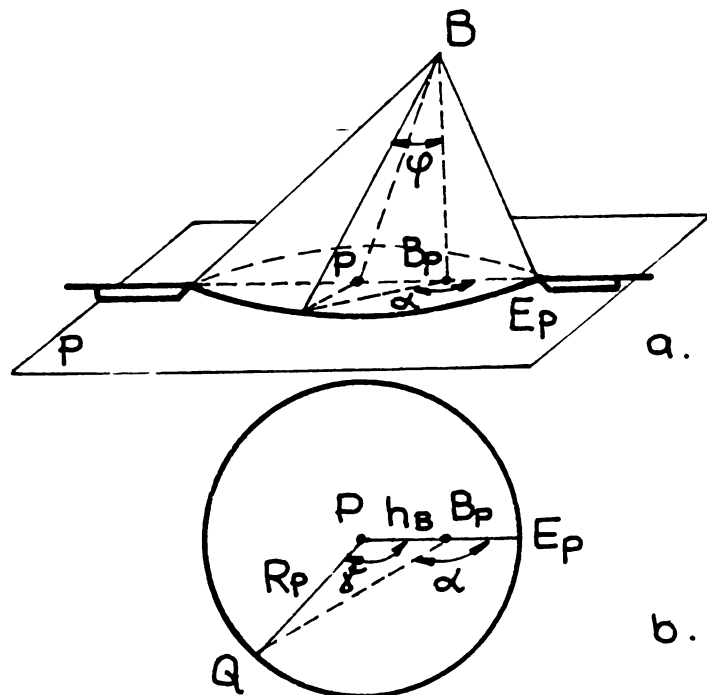


Fig.6.18 Fascicolul de lumină obiect pentru $r \in [0, r_1]$

b. Obiect situat la infinit
($s = -\infty$)

Fluxul luminos incident pe suprafața corespunzătoare petei de lumină din planul pupilei de intrare, pentru respectiv unghiul de incidență al fascicolului obiect paralel $\alpha = 0$ și $\alpha \neq 0$ are expresia (lucarna de intrare se consideră la distanță finită de S.O.):

$$\Phi|_{\alpha=0} = E_0 \cdot \pi R_p^2; \quad \Phi(\alpha) = E \cdot S_p(\alpha) \quad (6.46)$$

unde E_0 și $E(\alpha)$ sunt iluminările în planul pupilei de intrare pentru $\alpha = 0$, respectiv pentru $\alpha \neq 0$.

Conform definiției (6.7), coeficientul de vignetaie rezultă:

$$k = \frac{\phi(\alpha)}{\phi|_{\alpha=0}} = \frac{S_p \cos^4 \alpha}{\pi R_p^2} \quad (6.47)$$

unde $S_p(\alpha)$ este funcția definită prin relația (6.34).

Concluzie: Se observă că s-a obținut o expresie pentru care “legea lui \cos^4 ”, binecunoscută din literatura de specialitate este o particularizare prin ipotezele simplificatoare introduse la deducerea ei. Fenomenul este, prin relația (6.47), calitativ

surprins într-un mod analog (vezi alura funcției, de tipul celei din figura (6.17)), dar modelează mai exact fenomenul fizic.

Capitolul 7

SISTEME OPTICE MULTIPUPILARE

Aspectele tratate în acest capitol constituie o generalizare originală a aspectelor referitoare la limitarea fasciculelor de lumină incidente în sisteme optice (S.O.) centrate [B5,D16,N4].

În general acestea sunt proiectate pentru o poziție bine definită a planului obiect, fie la $s = -\infty$ (aparatele optice afocale), fie la o distanță finită s de S.O., aspecte incluse și în studiul realizat în Cap.6.

Există însă aplicații moderne (de exemplu în tehnica militară, în tehnica cinescopică, etc.) în care se pune problema ca, pentru poziții diferite ale obiectului (considerate pe intervale), diferite diafragme ale acestuia să joace rolul diafragmei de apertură astfel încât domeniul de utilizare (Dom s) al aparatului să crească, însă cu obținerea aceluiași parametri de calitate (în anumite limite), indiferent de așezarea planului obiect.

Sistemele optice care au această proprietate se vor numi **sisteme optice multipupilare**, iar studiul realizat în acest capitol urmărește caracterizarea acestora din punct de vedere geometric și fotometric, cu realizarea unei deschideri de cercetare ulterioară pentru acest domeniu deosebit de promițător.

Obiectivul îl constituie realizarea unor aparate optice mai apropiate de aspectul de “aparat optic universal”, mai apropiate de prototipul care îl constituie ochiul uman.

7.1. Determinarea pupilelor și lucarnelor de intrare. Caracterizarea geometrică a axei S.O. multipupilare

Se consideră un sistem optic centrat ideal. Fie $D_j (s_{D_j}, d_j)$, $j = \overline{1, n}$ - sistemul diaframelor fizice situate în fața S.O. și al imaginilor tuturor diaframelor S.O. construite prin mediile optice anterioare lor în sistem, adică sistemul posibilelor pupile de intrare. Numerotarea diaframelor se face în ordinea depărtării lor de S.O., astfel încât:

$$s_{D_{j+1}} < s_{D_j}, (\forall) j = \overline{1, n} \quad (7.1)$$

Se admite n finit, adică un sistem D_j $j = \overline{1, n}$ discret.

Cazul I: obiect punctiform axial

$(\forall) A \in A.O. \equiv \forall s$ (axa optică a S.O.), se pot defini două seturi de unghiuri (Fig.7.1):

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{D_j}(A) = \arctg \frac{\frac{d_j}{2}}{s_{D_j} - s}, \quad \forall D_j | s_{D_j} > s \\ \omega_{D_j}(A) = \arctg \frac{\frac{d_j}{2}}{s_p - s_{D_j}}, \quad \forall D_j | s_{D_j} > s_p \end{array} \right. \quad (7.2)$$

unde s_p este abscisa **pupilei de intrare**, adică a diafragmei D_k ce îndeplinește condiția (Fig.7.1):

$$\sigma_k(A) = \sigma_p(A) = \min \left\{ \sigma_{D_j}(A), \forall D_j | s_{D_j} > s \right\} \quad (7.3)$$

unde $\sigma_p(A)$ este unghiul de apertură obiect al S.O. pentru punctul obiect A.

Lucarna de intrare a S.O. este diafragma D_l ce îndeplinește condiția:

$$\omega_{D_l}(A) = \omega = \min \left\{ \omega_{D_j}(A), \forall D_j | s_{D_j} < s_p \right\} \quad (7.4)$$

unde ω este unghiul de câmp obiect.

Sistemul D_j , $j = \overline{1, n}$ se reduce astfel pentru punctul obiect A_l la pupila, respectiv lucarna de intrare.

Se folosesc notațiile:

$$\left\{ \begin{array}{l} s_{D_k} =: s_p, \quad \left\{ \begin{array}{l} d_k/2 =: R_p \\ d_l/2 =: R_L \end{array} \right. \\ s_{D_l} =: s_L \end{array} \right. \quad (7.5)$$

Punctele din planele pupilei, respectiv lucarnei de intrare vor primi indicii P, respectiv L.

Cazul II: obiect plan frontal

Pentru un S.O. centrat ideal, discuția este similară cu cea de mai sus, considerând $A = \pi_f \cap A.O. (\pi_f - \text{planul de front})$.

Cazul III: obiect filiform axial

Discuția purtată în cazul I este valabilă în acest caz pe tronsoane. Ne propunem să construim un șir de puncte A_i , $i = \overline{1, m}$ ($s_{A_{i+1}} < s_{A_i} < 0, (\forall) i = \overline{1, m}$), cu proprietatea că fiecărui tronson $|A_i, A_{i+1}|$ îi corespunde o unică pereche de diafragme:

$$\left\{ \begin{array}{l} D_{k_i} \equiv P_i - \text{pupila de intrare} \\ D_{l_i} \equiv L_i - \text{lucarna de intrare} \end{array} \right\} \text{ a obiectului } |A_i, A_{i+1}|, i = \overline{1, m-1}.$$

Considerând deplasarea punctului A pe A.O. de la vârful "A" al primului dioptru la $-\infty$ și utilizând seturile de unghiuri definite prin rel. (7.2), pupila P_i (definită prin poziția s_i și diametrul $2R_i$) este diafragma D_{k_i} pentru care:

$$\sigma_i(A) = \sigma_{D_{k_i}}(A) = \min \left\{ \sigma_{D_j}(A), \forall D_j | s_{D_j} > s, (\forall) A \in |A_i, A_{i+1}| \right\} \quad (7.6)$$

unde $\sigma_i(A)$ este unghiul de apertură obiect al S.O. pentru punctul obiect A.

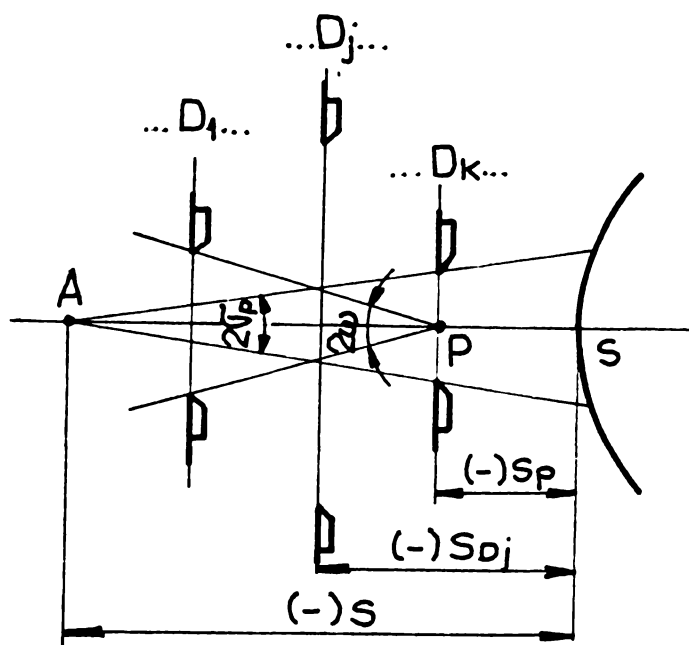


Fig.7.1 Unghiurile de apertură și de câmp obiect pentru S.O. multipupulare

Lucarna L_i este selectată apoi ca diafragma D_{ij} pentru care:

$$\omega_i := \omega_{D_i}(A) = \min \left\{ \omega_{D_j}(A), \forall D_j \mid s_{D_j} < s_{P_i} \right\} \quad (7.7)$$

Determinarea șirului de puncte axiale A_i , $i = \overline{1, m}$ este un proces iterativ, care comportă următoarele etape:

A. Determinarea primului punct, A_1 , din șirul punctelor A_i :

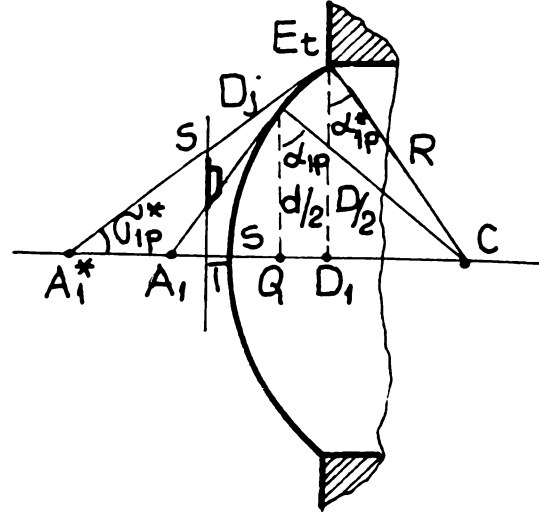
a) primul dioptru al S.O. este convex.

Se notează cu A_1^* punctul determinat de intersecția dintre A.O. și tangenta dusă la suprafața primului dioptru în punctul E_t , extremitatea monturii primei lentile (montură care constituie o diafragmă a S.O.).

Din figura 7.2, rezultă:

$$\begin{cases} s_{A_1^*} = R \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 - D^2/4R^2}} \right) \\ \sigma_{1p}^* = \arctg \sqrt{\frac{4R^2}{D^2} - 1} \end{cases} \quad (7.8)$$

(7.8) Fig. 7.2 Determinarea punctului A_1 pentru primul dioptru convex al S.O.



unde R, D sunt raza de curbură a primului dioptru, respectiv diametrul primei lentile a S.O.

Pot apărea următoarele situații:

$$\text{- Dacă } (\forall) D_j \mid s_{D_j} > s_{A_1^*}, \frac{d_j}{2} > TS = (s_{D_j} - s_{A_1^*}) \operatorname{tg} \sigma_{1p}^* \quad (7.9)$$

atunci rezultă: $A_1 = A_1^*$ și $P_1 = D_1$.

Dacă $\exists D_j \mid s_{A_1^*} < s_{D_j} < 0$ astfel încât $d_j/2 < TS$, atunci poziția punctului A_1 este dată de intersecția tangentei duse prin extremitatea diafragmei D_j la suprafața primului dioptru și A.O.

Procedând analog ca și la deducerea relațiilor (7.8), se obține:

$$\begin{cases} s_{A_1} = R \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{d^2}{4R^2}}} \right) \\ \sigma_{1p} = \arctg \sqrt{\frac{4R^2}{d^2} - 1} \end{cases} \quad (7.10)$$

unde d reprezintă deschiderea conului de lumină ce pornește din A_1 și se sprijină pe diafragma D_j (Fig.7.2):

$$d = \frac{4R^2 d_j \pm 4R(R - s_{D_j}) \sqrt{d_j^2 - 8R s_{D_j} + 4s_{D_j}^2}}{d_j^2 + 4(R - s_{D_j})^2} \quad (7.11)$$

$$s_{A_{i+1}} = \frac{s_{i+1}R_i - s_iR_{i+1}}{R_i - R_{i+1}}, \quad i = \overline{1, m-1} \quad (7.17)$$

numărul punctelor A_i fiind finit.

Observații: Din figura 7.4 rezultă:

$$\sigma_{i+1}(A) < \sigma_i(A), (\forall) A | s < s_{A_{i+1}} \quad (7.18)$$

De fapt, din definiția pupilei de intrare și din definiția punctelor A_i , relația de mai sus era valabilă $\forall A \in |A_{i+1}, A_{i-1}|$. Ea este cu atât mai mult valabilă pentru puncte A situate în stânga punctului A_{i+2} . Ținând seama de definiția 7.3, prin același raționament se obține:

$$\sigma_i(A) = \sigma_{D_{ki}}(A) < \sigma_{D_j}(A), (\forall) D_j | s_{D_j} > s \quad (7.19)$$

Din (6.65) și (6.66) rezultă:

$$\sigma_{i+1}(A) = \sigma_{D_{ki+1}}(A) < \sigma_{D_j}(A), (\forall) D_j | s_{D_j} > s \wedge (\forall) A | s < s_{A_{i+1}} \quad (7.20)$$

Observații:

1. Orice diafragmă situată între $D_{ki} \equiv P_i$ și S.O. nu mai poate fi pupilă de intrare pentru nici un punct A cu $s < s_{A_i}$. Eventual, dacă $\exists D_j | s_{D_j} < s_i$ pentru care să fie îndeplinită condiția $\sigma_{D_j}(A) < \sigma_{D_{ki}}$, atunci diafragma D_{ki} rămâne pupilă de intrare pentru $(\forall) A | s < s_{A_i}$.

Se poate spune, ținând seama și de faptul că numărul diagramelor este finit, că:

2. $\exists D_{km} \equiv P_m$ astfel încât $(\forall) D_j | s_{D_j} < s_m$,

$$\sigma_{D_j}(A) > \sigma_{D_{km}}(A) = \sigma_m(A), (\forall) A | s < s_{A_m} \quad (7.21)$$

Prin urmare numărul punctelor axiale A_i în care se poate segmenta A.O. astfel încât fiecărui tronson $|A_i, A_{i+1}|$ să-i corespundă o anumită pereche, unică, de diafragme: pupilă, lucarnă de intrare, este finit; evident, $m < n$.

Pupila P_m definită de (7.21) va fi pupilă de intrare pentru obiectul axial $|A_m, A_\infty$. (A_∞ = punctul de la ∞ pe A.O.).

3. Din relația (7.14) se observă că, deoarece $s_{i+1} < s_i$, pentru ca punctul A_{i+1} să existe, trebuie să avem $R_{i+1} < R_i$, deci o condiție necesară (nu și suficientă) pentru ca o diafragmă să devină pupilă de intrare pentru un anumit tronson $|A_h, A_{h+1}|$, $h \in \{i, i+1, \dots, m-1\}$ este să se situeze în stânga pupilei P_i și să aibă deschiderea mai mică decât aceasta.

Consecință:

4. Pupila P_m nu are în stânga sa nici o diafragmă cu deschidere mai mică. Se poate verifica astfel dacă s-a găsit sau nu pupila ce caracterizează punctul de la infinit.

De asemenea, din observația 3 rezultă:

5. Nici o diafragmă nu poate fi pupilă de intrare pentru două tronsoane diferite $|A_i, A_{i+1}|$, $|A_h, A_{h+1}|$, $i, h = \overline{1, m-1}$, $m-1$, $i \neq h$ ale obiectului filiform axial considerat.

6. Din figura 7.4, relația (7.14) se mai poate scrie sub forma convenabilă:

$$\operatorname{tg} \sigma_i(A_{i+1}) = \operatorname{tg} \sigma_{i+1}(A_{i+1}) = \frac{R_i - R_{i+1}}{s_i - s_{i+1}} \quad (7.22)$$

7.2. Caracterizarea fotometrică a axei S.O. multipupulare. Apertura fotometrică

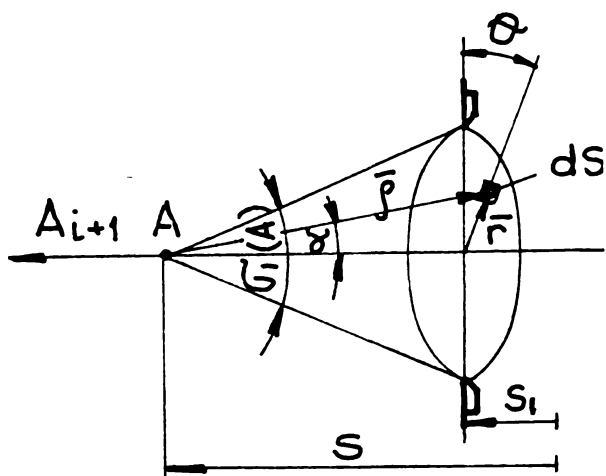


Fig.7.5 Obiect punctiform axial (sursă izotropă)

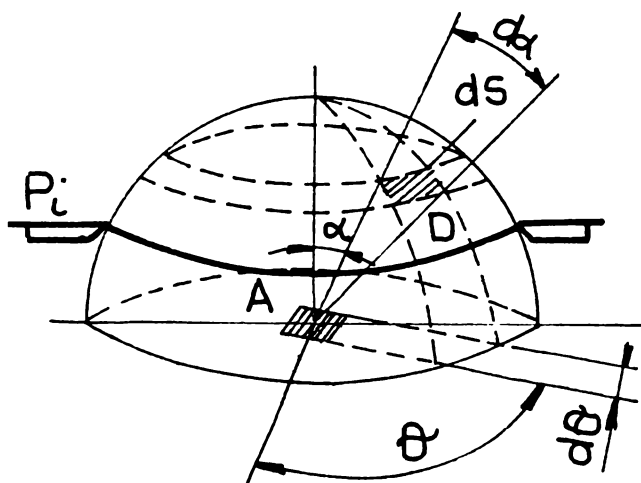


Fig.7.6 Sursă Lambert (suprafață elementară frontală)

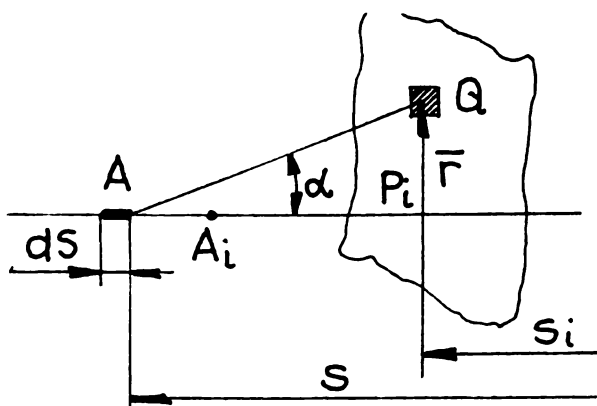


Fig.7.7 Obiect filiform axial
de continuitate a lui Φ_A , în pofida defnirii sale pe tronsoane.

Interesează fluxul luminos incident pe S.O. considerând obiecte axiale - suprafețe elementare având anumite configurații geometrice, situate în punctul $A(s)$, $s \in (-\infty, s_{A1}]$ în fața S.O.

Se va avea în vedere doar acțiunea de limitare a fasciculelor de lumină de către sistemul pupilelor de intrare, neglijându-se difracția la marginile diaframelor (circular) și absorbția în mediile optice.

Mărimile implicate în calcul sunt cele prezentate în Anexa 1, iar mersul de calcul comportă etapele descrise în schema logică din figura A1.6.

Se vor considera trei obiecte-probă, de configurații geometrice și fotometrice diferite:

- obiect punctiform axial (sursă izotropă de intensitate I), figura 7.5;
- obiect plan frontal (suprafață elementară poziționată pe A.O., decupată dintr-un plan de front considerat ca sursă Lambert) de intensitate maximă I_m - figura 7.6;
- obiect filiform axial (obiect cilindric dispus după A.O., având diametrul δ mult mai mic decât oricare dimensiune sau distanță luată în discuție) - figura 7.7.

În tabelul 7.1 sunt centralizate etapele calculului fotometric realizat conform schemei logice specifice necesare (Fig. A1.6) utilizând notațiile din respectiv figurile 7.5,7.6,7.7, mersul de calcul fiind cel prezentat în Anexa 1.

Observații:

1. Calculând limitele funcției flux Φ_A la capetele tronsonului $A_i A_{i+1}$, se poate observa, în fiecare din cele 3 cazuri considerate, datorită condiției (7.15), respectarea condiției de

2. Calculând panta $d\Phi_A/ds$ a funcției flux (tab. 7.1), se observă imediat respectarea, în fiecare dintre cele 3 cazuri, a condiției:

$$\lim_{\substack{s \rightarrow s_{A_{i+1}} \\ s > s_{A_{i+1}}}} \frac{d}{ds} \phi_{.A} = \frac{2\pi l}{R_i [1 + \text{ctg}^2 \sigma_i(A_{i+1})]^{3/2}} < \lim_{\substack{s \rightarrow s_{A_{i+1}} \\ s < s_{A_{i+1}}}} \frac{d}{ds} \phi_{.A} = \\ = \frac{2\pi l}{R_{i+1} [1 + \text{ctg}^2 \sigma_{i+1}(A_{i+1})]^{3/2}}$$
(7.23)

scrisă aici pentru cazul obiectului #1.

3. Se poate determina (Tab.7.1), fluxul limită, Φ_{lim} , emis de fiecare configurație de obiect probă printr-o semisferă centrată în A-cazul corespunde situației când $A \rightarrow P$.

4. Are sens, în cazul obiectului filiform #3, determinarea iluminării $E_i(r)$ produsă într-un punct $D(r, \theta) \in P_i$, de către tronsonul $|A_i A_{i+1}|$. Transpunând relația (A1.63) cu noile notații, rezultă:

$$E_i(r) = \int_{s_{.A_{i+1}}}^{s_{.A_i}} E_D = \frac{Lr\delta}{2} \left[\frac{1}{r^2 + (s_i - s_{.A_i})^2} - \frac{1}{r^2 + (s_i - s_{.A_{i+1}})^2} \right], r \in [0, R_i] \quad (7.24)$$

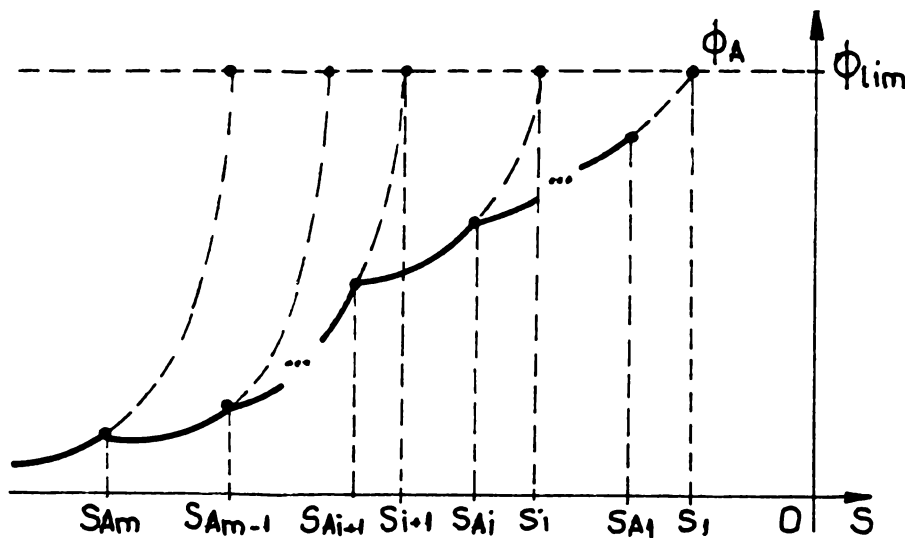


Fig.7.8 Caracterizarea fotometrică a axei optice a S.O.

în tabelul 7.1.

Are sens definirea unui **coeficient fotometric obiect axial**:

$$\chi = \phi_A / \phi_{\text{lim}} \quad (7.25)$$

reprezentând **raportul dintre fluxul Φ_A emis de un obiect de o anumită configurație prin sistemul pupilelor unui S.O. multipupilar și fluxul Φ_{lim} emis de același obiect dacă acesta s-ar găsi în centrul primei pupile de intrare ale S.O.** Pentru configurațiile de obiecte considerate în acest paragraf, χ are expresiile din tabelul 7.1 și alura graficului $\chi(s)$ dată de figura 7.8.

Centralizând rezultatele obținute, pentru un S.O., χ are expresiile:

Concluzie:
Oricare ar fi configurația geometrică a obiectului - test axial poziționat în fața S.O., fluxul luminos $\phi_A(s)$ emis de acesta prin sistemul pupilelor de intrare a S.O. are alura din figura 7.8, cu valoarea maximă ϕ_{lim} și cu expresia pantei curente $d\phi_A/ds$ date, pe lângă expresia efectivă a fiecărei funcții $\phi_A(s)$,

$$\chi = \begin{cases} 1 - \cos \sigma_i(A), & \text{pentru obiect punctiform} \\ \frac{1 - \cos 2\sigma_i(A)}{2}, & \text{pentru obiect plan frontal} \\ \frac{2\sigma_i(A) - \sin 2\sigma_i(A)}{\pi}, & \text{pentru obiect filiform axial} \end{cases} \quad \forall A \in |A_i, A_{i+1}|, i = \overline{1, m-1} \quad (7.26)$$

cu observația că în practica actuală se folosește obișnuit un domeniu limitat (a lui s) pentru care **sistemul optic este efectiv proiectat și utilizat**.

Este remarcabil faptul că χ este de fapt **apertura fotometrică**, mărime care este propusă a fi introdusă în calculul S.O., de vreme ce apertura numerică (de tip generalizat, definită pentru S.O. multipupilar):

$$A_{i,p} = n_i \sin \sigma_i(A) \quad (7.27)$$

(n_i = indicele de refracție al spațiului obiect) are, după cum se poate ușor vedea, o alură asemănătoare, ca funcție de abscisa s , cu cea prezentată în figura 7.8.

Caz particular: Pentru un S.O. unipupilar, $\chi_a(s)$ are expresiile:

$$\chi = \begin{cases} 1 - \cos \sigma_p = 2 \sin^2 \sigma_p, & \text{pentru obiect punctiform} \\ \sin^2 2\sigma_p, & \text{pentru obiect plan frontal} \\ \frac{2\sigma_p - \sin 2\sigma_p}{\pi}, & \text{pentru obiect filiform axial} \end{cases} \quad (7.28)$$

unde:
$$\sigma_p = \arctg \frac{R_p}{s_p - s} \quad (7.29)$$

este unghiul de apertură obiect al S.O., cu R_p, s_p = raza, respectiv abscisa pupilei de intrare.

Alura graficului funcției $\Phi(s)$ este cea reprezentată în figura 7.9, cu observația că există un domeniu alui s (nu neapărat limitat spre $-\infty$) pentru care sistemul optic este efectiv proiectat și utilizat.

Concluzie: S-a ajuns așadar la o convergență între aspectele fotometrice și cele referitoare la definirea caracteristicilor unui S.O., caracteristici din a căror expresie apertura numerică rezultă într-un mod oarecum convențional. **De fapt, se poate spune că motivația pentru care apertura numerică poate caracteriza deschiderea pupilei unui S.O. unipupilar, respectiv a pupilelor unui S.O. multipupilar este aceea că alura graficului ei este analoagă celei a unei funcții de tip χ - apertura fotometrică, așadar este un caz particular al aperturii fotometrice.**

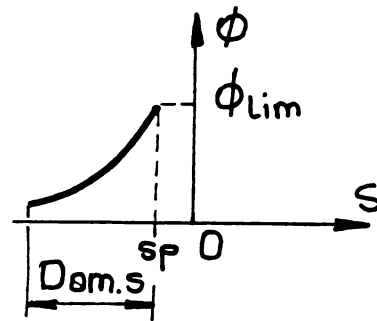


Fig. 7.9 Graficul funcției $\Phi(s)$

7.3. Coeficientul fotometric axial al unui sistem optic multipupilar

a. Fluxul emis de obiectul $|A_1 A_m|$

Fie obiectul filiform axial considerat în paragraful precedent. Fluxul emis de tronsonul $|A_i A_{i+1}|$, $i = \overline{1, m-1}$ prin pupila de intrare P_i este, utilizând expresia iluminării E_i produse de întreg tronsonul într-un punct $D(r, \theta) \in P_i$:

$$\phi_i = \int_0^{2\pi R_i} \int_0^R E_i(r) r \cdot dr \cdot d\theta \quad (7.30)$$

Înlocuind $E_i(r)$ și efectuând calculele, rezultă:

$$\phi_i = \pi L \delta \left[(s_i - s_{A_{i+1}}) \operatorname{arctg} \frac{R_i}{s_i - s_{A_{i+1}}} - (s_i - s_{A_i}) \operatorname{arctg} \frac{R_i}{s_i - s_{A_i}} \right] \quad (7.31)$$

sau, deoarece, din figura 7.4:

$$\sigma_i(A_{i+1}) = \operatorname{arctg} \frac{R_{i+1}}{s_{i+1} - s_{A_{i+1}}} = \operatorname{arctg} \frac{R_i}{s_i - s_{A_{i+1}}} = \operatorname{arctg} \frac{R_i - R_{i+1}}{s_i - s_{i+1}} \quad (7.32)$$

se mai poate scrie:

$$\phi_i = \pi L \delta \left[(s_i - s_{A_{i+1}}) \sigma_i(A_{i+1}) - (s_i - s_{A_i}) \sigma_i(A_i) \right] \quad (7.33)$$

La același rezultat se poate ajunge și făcând aria subgraficului funcției $\phi_A(s)$ pentru $s \in [s_{A_{i+1}}, s_{A_i}]$ corespunzătoare obiectului filiform (Fig. 7.8).

Observație: Datorită faptului că $\sigma_i(A) \leq \sigma_1(A)$, $(\forall) A \in |A_i, A_{i+1}|$, $i = \overline{1, m-1}$, fluxul ϕ_i dat de obiectul $|A_i, A_{i+1}|$ prin pupila P_i trece integral prin P_1 , ajungând astfel pe suprafața primului dioptru al S.O.

Prin sumarea fluxurilor ϕ_i se obține practic fluxul de lumină ce se regăsește pe suprafața (S) a primului dioptru, flux emis de un anumit tronson al obiectului filiform axial considerat. Rezultă:

- fluxul de lumină emis de obiectul filiform axial $|A_1 A_m|$:

$$\phi_{1m} = \sum_{i=1}^{m-1} \phi_i \quad (7.34)$$

Cu (7.33) în (7.34), se deduce:

$$\begin{aligned} \phi_{1m} = \pi L \delta \sum_{i=2}^{m-2} (R_i - R_{i+1}) \sigma_i(A_{i+1}) \cdot \operatorname{ctg} \sigma_i(A_{i+1}) + \\ + \pi L \delta [R_{m-1} \sigma_{m-1}(A_m) \cdot \operatorname{ctg} \sigma_{m-1}(A_m) - R_1 \sigma_1(A_1) \cdot \operatorname{ctg} \sigma_1(A_1)] \end{aligned} \quad (7.35)$$

- fluxul de lumină emis de obiectul $|A_m A_\infty|$.

Făcând o trecere la limită a relației (7.31) pentru $i = m$, se obține:

$$\phi_{m\infty} = \pi L \delta \left[\lim_{s \rightarrow -\infty} (s_m - s) \operatorname{arctg} \frac{R_m}{s_m - s} \right] - \pi L \delta (s_m - s_{A_m}) \operatorname{arctg} \frac{R_m}{s_m - s_{A_m}} \quad (7.36)$$

și cum:

$$\lim_{s \rightarrow -\infty} \frac{\operatorname{arctg} \frac{R_m}{s_m - s}}{s_m - s} = R_m \quad (7.37)$$

rezultă:

$$\Phi_{\max} = \pi L \delta [R_m - (s_m - s_{A_m}) \sigma_m(A_m)] \quad (7.38)$$

- fluxul de lumină emis de obiectul $|A_1A_\infty$ se obține prin însumare, ținând seama de relațiile (7.35), (7.36):

$$\phi_{1\infty} = \pi L \delta [R_m - (s_1 - s_{A1})\sigma_1(A_1)] + \sum_{i=2}^{m-1} (s_i - s_{i+1})\sigma_1(A_{i+1}) \quad (7.39)$$

b. fluxul luminos emis de un tronson de lungime l_t a obiectului filiform

A) printr-o suprafață cilindrică înfășurătoare, de rază R , centrată pe obiect (Fig.6.36) utilizând discuția din §4.5.3.a, fluxul căutat rezultă – rel.(A1.53):

$$\phi = \int_{z=z_0}^{l_t+z_0} \phi_A = 2\pi L \delta \cdot l_t \cdot \operatorname{arctg} \frac{l_t}{R} \quad (7.40)$$

B) printr-o suprafață disc centrată pe axa obiectului filiform și perpendiculară pe aceasta (Fig.6.37):

Utilizând discuția din §A1, fluxul emis de obiectul de lungime l_t prin discul de rază R va avea expresia – rel.(A1.64):

$$\phi_p = \int_{z=z_0}^{l_t+z_0} \phi_A = \pi \cdot L \cdot \delta \left[(z_p - z_0 - l_t) \operatorname{arctg} \frac{R}{z_p - z_0 - l_t} - (z_p - z_0) \operatorname{arctg} \frac{R}{z_p - z_0} \right] \quad (7.41)$$

Observație: Conform rezultatului obținut prin relațiile (7.40) și (7.41), emitanța medie a sursei filiforme infinite de tip Lambert este:

$$M = \lim_{l_t \rightarrow \infty} \frac{\phi + \phi_p}{\pi \delta l_t} = \pi L \quad (7.42)$$

Se obține aceeași expresie ca și în cazul clasic al unei suprafețe elementare L sursă Lambert care radiază într-o emisferă cu sursa în centrul ei (v. A1), ceea ce constituie un rezultat original semnificativ al studiului realizat.

c. Coeficientul fotometric axial global

Raportul dintre fluxul luminos emis de obiectul $|A_1A_\infty$ (adică de întreaga axă optică obiect), prin pupilele S.O. multipupilar și fluxul mediu emis de unitatea de lungime obiect definește un coeficient de utilizare a energiei luminoase disponibile pe axa optică a unui S.O. multipupilar. Acest nou parametru va fi denumit **apertură fotometrică generalizată** (χ).

Din relațiile (7.39) și (7.42), expresia sa matematică este:

$$\chi = \frac{\phi_{1\infty}}{\lim_{l_t \rightarrow \infty} (\phi + \phi_p) / l_t} = \frac{1}{\pi} \left[R_m - (s_1 - s_{A1})\sigma_1(A_1) + \sum_{i=2}^{m-1} (s_i - s_{i+1})\sigma_1(A_{i+1}) \right] \quad (7.43)$$

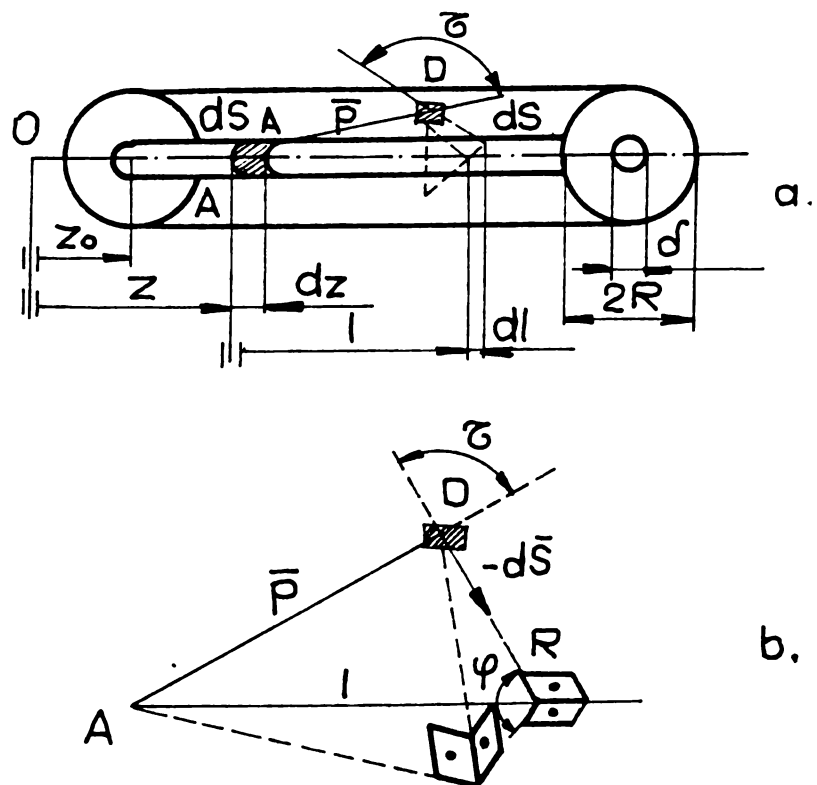


Fig.7.10 Calculul fluxului emis de un obiect filiform prin suprafața sa laterală

Observație: Având în vedere definiția fluxului geometric elementar:

$$dG = d\phi / L$$

este evident că expresiile de mai sus pot fi transcrise din flux luminos în flux geometric, datorită suprafeței emitente de tip Lambert considerate.

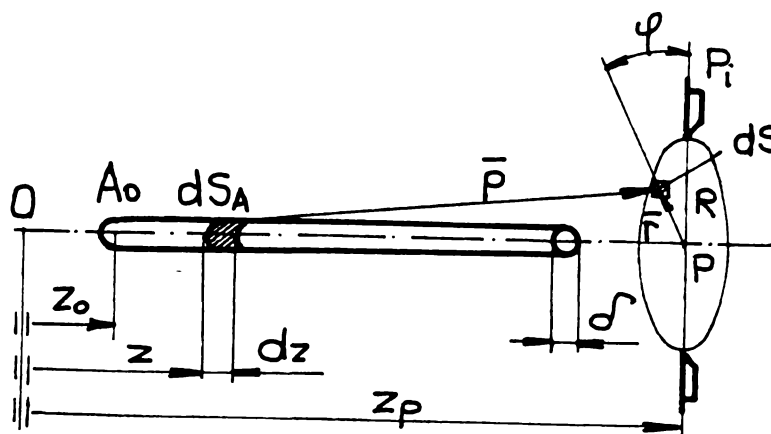


Fig.7.11 Calculul fluxului emis de un obiect filiform axial prin suprafața pupilei P_i

Tabelul 7.1

Tipul obiectului axial Mărimea	#1 punctiform	#2 plan frontal (suprafață elementară)	#3 filiform (suprafață elementară)
Intensitatea I	$I = ct.$	$I_m \cos \alpha; I_m = ct.$	$I_m \sin \alpha; I_m = ct.$
Iluminarea dE_A	$\frac{I(s_i - s)}{[(s_i - s)^2 + r^2]^{3/2}}$	$\frac{I_m \cos^2 \alpha}{p^2}$	$\frac{I_m (s_i - s)r}{[(s_i - s)^2 + r^2]^2}$
Aria suprafeței elementare dS	$r dr d\theta$	$p^2 \sin \alpha d\alpha d\theta$	$r dr d\theta$
Fluxul ϕ_A	$2\pi I [1 - \cos \sigma_i(A)]$	$\pi I_m \frac{[1 - \cos 2\sigma_i(A)]}{2}$	$\frac{\pi I_m [2\sigma_i(A) - \sin 2\sigma_i(A)]}{2}$
Fluxul limită ϕ_{lim}	$2\pi I$	πI_m	$\pi^2 I_m / 2$
Panta $d\phi_A/dS$ a funcției flux	$\frac{2\pi I}{R_i} \sin^3 \sigma_i(A)$	$\frac{2\pi I_m \operatorname{tg} \sigma_i}{R_i [\operatorname{tg}^2 \sigma_i(A) + \operatorname{ctg}^2 \sigma_i(A)]^2}$	$\frac{\pi I_m \sin^4 \sigma_i(A)}{R_i}$
Coeficientul χ	$1 - \cos \sigma_i(A) =$ $= 2 \sin^2 \frac{\sigma_i(A)}{2}$	$\frac{1 - \cos 2\sigma_i(A)}{2} = \sin^2 \sigma_i(A)$	$\frac{2\sigma_i(A) - \sin 2\sigma_i(A)}{\pi}$

7.4. Izoluxe determinate de un obiect axial filiform pe suprafața pupilelor de intrare

Fasciculele de lumină incidente pe suprafața pupilei de intrare P_i , $i = \overline{1, m}$ și provenind de la tronsonul $|A_k A_\infty, k > i|$ iluminează doar punctele discului $D(P_i, h_k^{(i)})$, unde, din figura 7.30:

$$h_k^{(i)} = R_k \frac{s_i - s_{A_k}}{s_k - s_{A_k}}, \quad k = \overline{i, m} \quad (7.45)$$

Ca o consecință, iluminarea $E_i(r)$ în punctul $Q(r, \theta) \in P_i$, caracterizat prin $r \in [h_{k+1}, h_k]$ este dată de tronsoanele $|P_i A_i|$ (numai pentru $i > 1$), $|A_i A_k|$ și $|A_k A(r)|$, unde $A(r)$ este dată de (Fig.7.10):

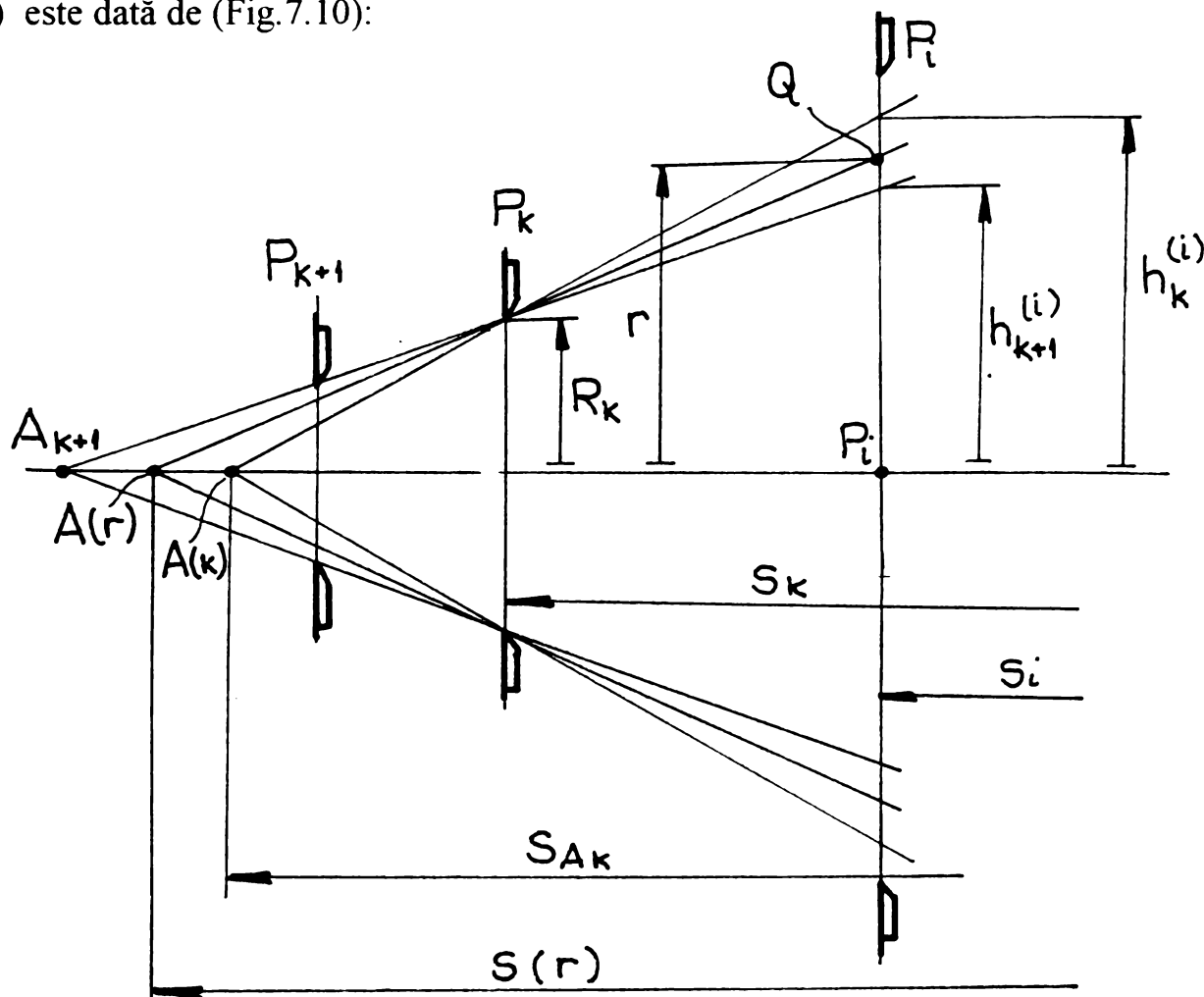


Fig.7.12 Fascicule de lumină incidente pe planul P_i provenind de la diferite puncte axiale

$$s(r) = \frac{s_k r - s_i R_k}{r - R_k} \quad (7.46)$$

Iluminarea în $Q(r, \theta) \in P_i$ rezultă așadar:

$$E(r) = (1 - \delta_{1i}) \int_{s_{A_i}}^{s_i} dE + \sum_{j=1}^{k-1} E_j + \int_{s(r)}^{s_{A_k}} dE, k = \overline{i, m-1} \quad (7.47)$$

unde δ_{1i} este simbolul lui Kroneker (1 pentru $i = 1$ și 0 pentru $i \neq 1$), iar E_j iluminarea produsă de tronsonul $|A_j A_{j+1}|$ în $Q \in P_i$, dată de o relație de tipul (7.24). Transpunând-o cu noile notații:

$$E_j(r) = \frac{Lr\delta}{2} \left[\frac{1}{r^2 + (s_i - s_{A_j})^2} + \frac{1}{r^2 + (s_i - s_{A_{j+1}})^2} \right] \quad (7.48)$$

Realizînd calculul, din rel.(7.47) se obține :

-pentru $i = 1$ ($Q \in P_1$ -prima pupilă de intrare), primul termen al relației (7.47) se anulează și rezultă:

$$\begin{cases} \cos \varepsilon = \frac{R^2 - z \cdot z_i}{R_p} \\ \sin \sigma = h/p \\ p^2 = h^2 + (z + z_i)^2 \end{cases} \quad (7.54)$$

Înlocuind rel.(7.54) în (7.53) și ținând seama că $I_m = L \cdot dS_A$, cu $dS_A = \pi \delta \cdot dz$, rezultă:

$$dE = \frac{\pi L \delta}{R} \cdot h \cdot \frac{R^2 - z \cdot z_i}{h^2 + (z - z_i)^2} dz \quad (7.55)$$

Integrând după punctele tronsonului axial $|A_j A_{j+1}|$ (Fig.7.11), iluminarea produsă de acesta în I este:

$$E_j(h) = \int_{z_{A_{j+1}}}^{z_{A_j}} dE = \frac{\pi L \delta}{2R} h \left[\frac{z}{h^2 + (z - z_i)^2} + \frac{z_i^2}{h^2} \cdot \frac{z - z_i}{h^2 + (z - z_i)^2} + \frac{R^2}{2h^3} \arctg \frac{z - z_i}{h} \right] \Big|_{z_{A_{j+1}}}^{z_{A_j}} \quad (7.56)$$

unde $z_i^2 = R^2 - h^2$ (7.57)

Observații: 1. Sistemul pupilelor de intrare P_i , $i = \overline{1, m}$ delimitează pe suprafața primului dioptru "m" calote sferice, calota "i" fiind caracterizată de faptul că toate punctele ei primesc lumina de la obiectul $|A_1 A_i|$.

2. Fasciculele luminoase incidente pe S.O. de la obiectul $|A_o A_i|$ $i = \overline{1, m}$ produc o iluminare doar în punctele unei zone circulare cu $\varphi < \varphi_i$ (Fig.7.12), respectiv $h < h_i$, unde:

$$\varphi_i = 2 \arctg \left[\frac{R}{R_i} \cdot \frac{z_{A_i} - z_i}{z_{A_i} + R} + \sqrt{\left(\frac{R}{R_i} \cdot \frac{z_{A_i} - z_i}{z_{A_i} + R} \right)^2 - \frac{z_{A_i} - R}{z_{A_i} + R}} \right] \quad i = \overline{1, m} \quad (7.58)$$

3. Fiecărui punct $I(\varphi)$ de pe suprafața primului dioptru îi corespunde un punct $A(z(\varphi))$, cu:

$$z(h) = \frac{z_i h - z_i R_i}{h - R_i} \text{ sau } z(\varphi) = R \frac{z_i \sin \varphi - R_i \cos \varphi}{R \sin \varphi - R_i} \quad (7.59)$$

cu proprietatea că punctul A este cel mai îndepărtat punct de S.O. (de V) care mai produce o iluminare în I.

Concluzie: Iluminarea totală produsă de obiectul filiform în punctul I de pe suprafața primului dioptru poate fi scrisă:

$$E(\varphi) = \sum_{j=1}^{i-1} \int_{z_{A_j}}^{z_{A_{j+1}}} dE + \int_{z(\varphi)}^{z_{A_i}} dE \quad (7.60)$$

Observație: Se mai poate lucra cu **unghiul de apertură obiect:**

$$\sigma = \arctg \frac{h}{z - z_i} = \arctg \frac{h - R_i}{z_i - z_i} = \sigma(z, I(\varphi)) \quad (7.61)$$

cu ajutorul căruia relația (7.56) se transcrie:

$$E_j = \frac{\pi L \delta}{2R \sin^2 \varphi} \left[\frac{\pi}{2} - \sigma + \sin 2\sigma + \sin 2\varphi \cdot \sin^2 \sigma \right] \Big|_{z=z_{A_j}}^{z_{A_{j-1}}} \quad (7.62)$$

Rezultatul final, **iluminarea în punctul I**(φ) este, efectuând calculele în rel.(7.60), și ținînd seama de (7.56):

$$E(\varphi) = \frac{\pi L \delta}{2 \sin \varphi} \left[\frac{z - R \cos^3 \varphi}{R^2 \sin^2 \varphi - (z - R \cos \varphi)^2} + \frac{1}{2R \sin \varphi} \arctg \frac{z - R \cos \varphi}{R \sin \varphi} \right] \Big|_{z=z_{A_1}}^{z(\varphi)} \quad (7.63)$$

unde $\varphi \in [\varphi_i, \varphi_{i+1}]$, iar $z(\varphi)$ este dat de relația (7.59)₂.

S-a obținut astfel caracteristica izoluxei $C(C_1, h)$ de pe suprafața primului dioptru al S.O.

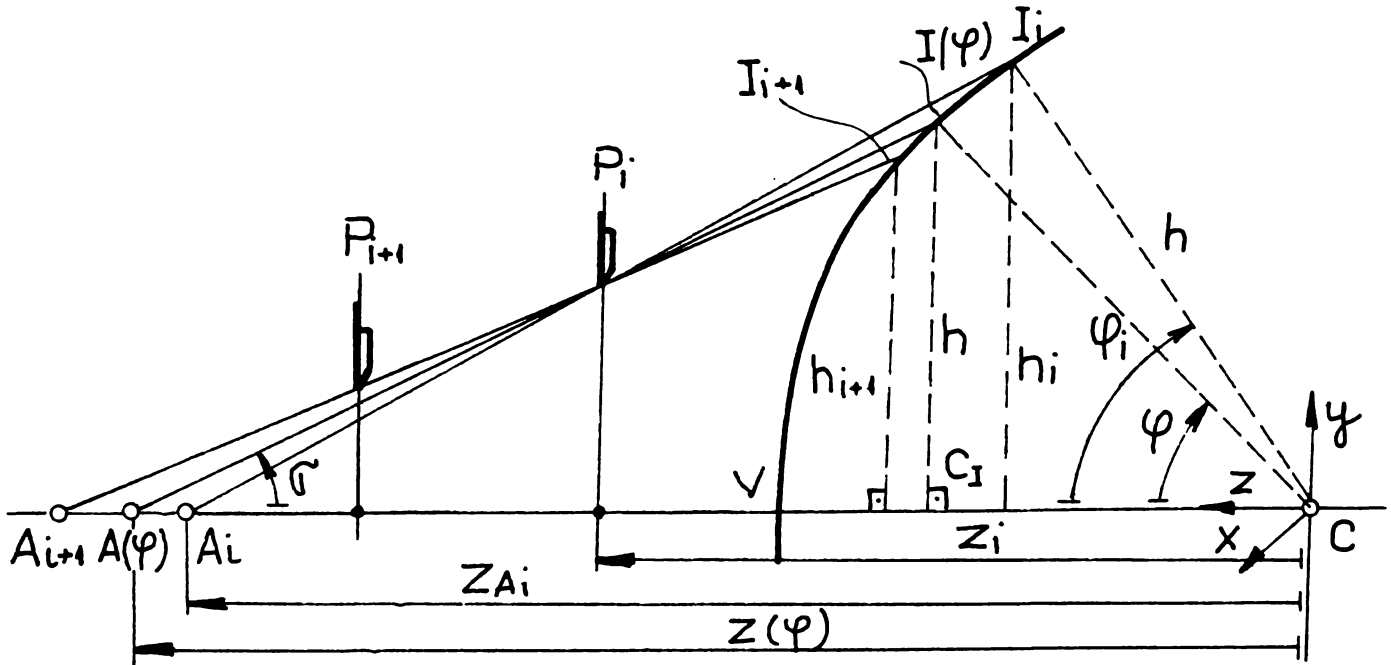


Fig.7.14. Fascicule de lumină incidente pe suprafața primului dioptru al S.O., provenind de la diferite puncte axiale

Partea a IV-a

STUDIUL EXPERIMENTAL AL PROCESULUI DE SCANARE. CONCLUZII

Capitolul 8 DETERMINĂRI EXPERIMENTALE ÎN ANALIZA ȘI SINTEZA DISPOZITIVELOR DE SCANARE CU OGLINZI ROTITOARE

8.1. Dispozitive de scanare cu oglindă poligonală

Funcția de scanare $h(\Theta)$, cu $\Theta = \omega t$, $\omega = ct$, este dată de relația:

$$h(\Theta) = R\sqrt{2} - e - \frac{R}{\cos \Theta} + e \cdot \operatorname{tg} \Theta - L \cdot \operatorname{ctg} 2\Theta$$

(3.54)

unde mărimile ce intervin au fost definite în §3.2.

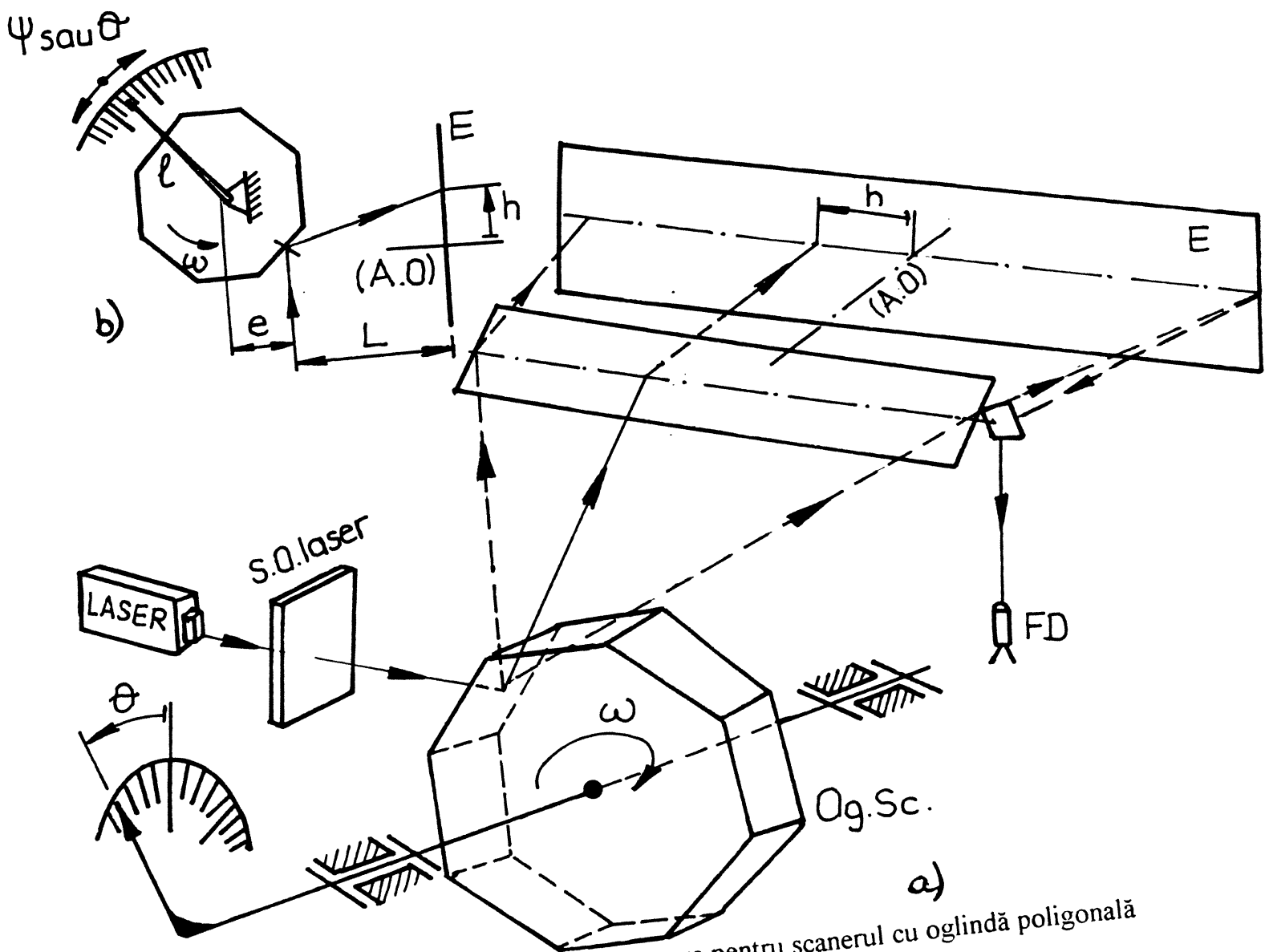


Fig.8.1. Determinarea funcției de scanare pentru scannerul cu oglindă poligonală

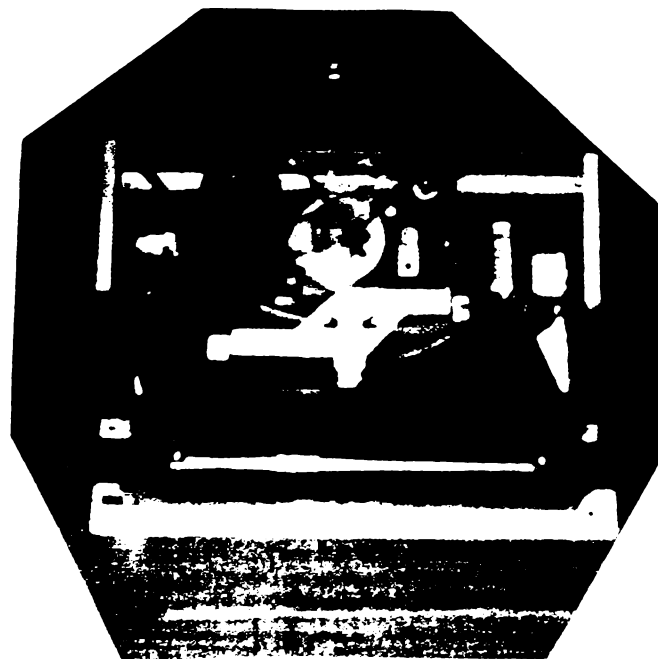
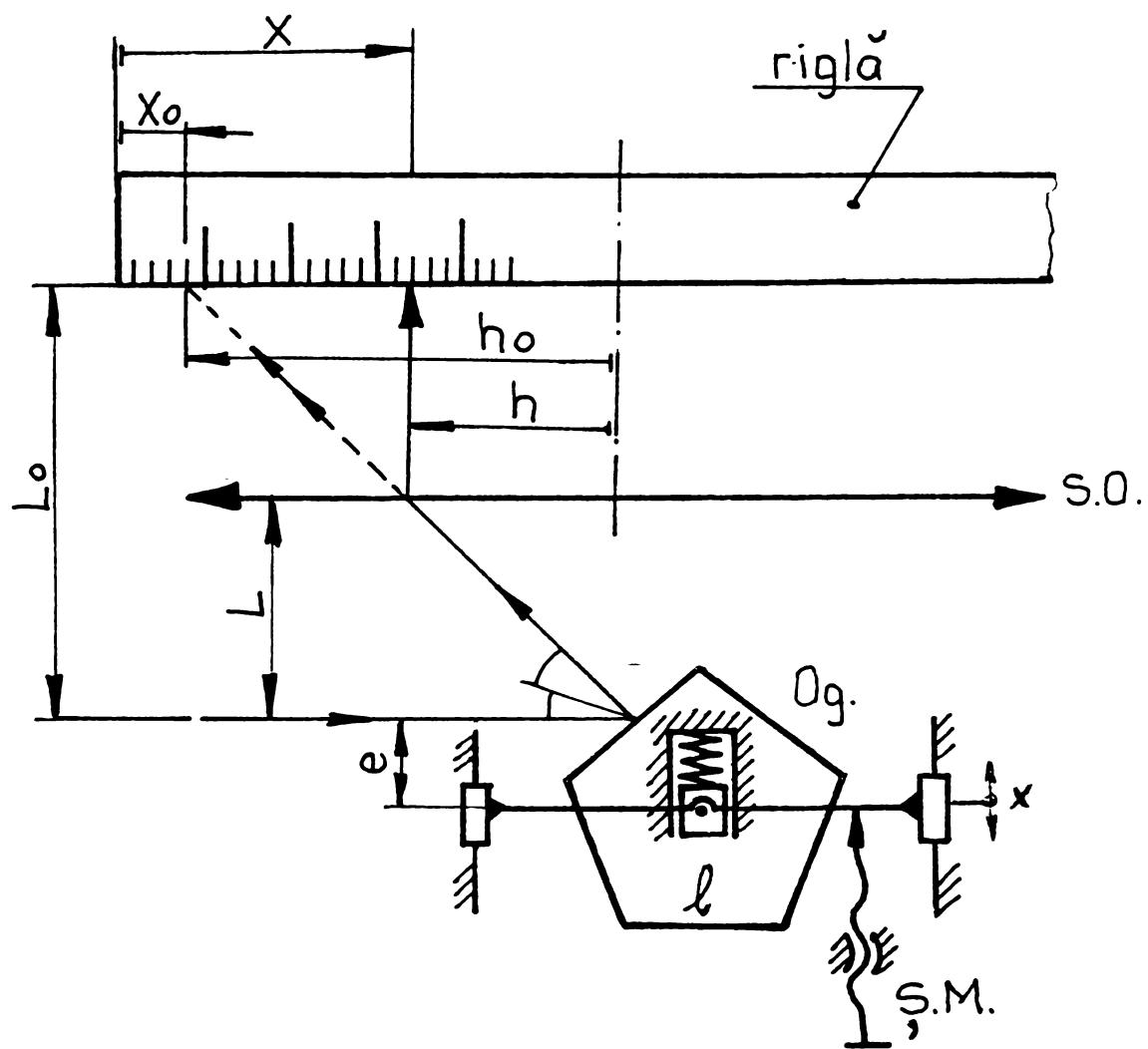


Fig.8.2. Standul experimental pentru studiul funcției de scanare pentru scannerul cu oglindă poligonală: a) schema de principiu
b) foto

Schema de determinare a funcției $h(\Theta)$ este prezentată în fig.8.1. Standul experimental (fig.8.2) a fost realizat utilizând elemente constructive din componența capului de scanare al unei imprimante laser.

S-a utilizat o oglindă poligonală cu $n=5$ laturi. Dioda laser furnizează o rază colimată în sistemul optic propriu (S.O. laser). Raza laser fixă (cu excentricitatea „e” față de axa de rotație a oglinzii –v.fig.8.1.b) este reflectată de o față a poligonului, acesta primind o mișcare indexată, cu un increment unghiular $\Delta\Theta = ct$ convenabil ($1^\circ; 2^\circ$ sau 5°). Raza reflectată cade pe oglinda fixă Og , înclinată la 45° față de direcția razei și de acolo într-un plan poziționat într-un unghi drept față de planul inițial, este proiectată pe ecranul E, în care se găsește rigla gradată.

Fotodetectorul FD marchează sfârșitul procesului de scanare util (cel corespunzător domeniului de măsurare). Acesta se suprapune însă doar într-un caz particular (v. §3.2: $\Theta_2 = \Theta_{\max}$) cu sfârșitul scanării unei fețe a poligonului. Semnalul furnizat de FD marchează practic numărul de scanări efectuate, putând fi conectat la un numărător. Se poate astfel determina fie frecvența impusă prin tema de proiectare, fie, având o anumită frecvență impusă prin tema de proiectare, se reglează turația motorului de antrenare a oglinzii poligonale (deci ω) astfel încât să se realizeze frecvența respectivă.

Măsurătorile se pot realiza:

- A. **în regim static** (cu mișcare indexată a oglinzii Og): se poziționează Og convenabil, într-o anumită poziție Θ , măsurată pe raportor (v. discuția anterioară); rezultă funcția $h(\Theta)$.
- B. **În regim dinamic** („real”): se pune în mișcare Og poligonală cu viteza unghiulară $\omega = ct$, reglabilă de la motor de antrenare pas-cu-pas. Rezultă $\Theta = \omega t$, așadar se poate înregistra $h(t)$ de exemplu cu o cameră CCD care să înregistreze deplasarea spotului laser pe ecranul E.

Determinarea funcției de scanare este concludent să se facă:

- a) fără sistemul optic (S.O.1) refractant de tip colimator (fig.3.7):

se poate observa astfel nelinearitatea lui $h(\Theta)$ –v.rel. (3.54)-, aspect ce trebuie verificat. De asemenea este posibil să se verifice astfel celelalte aspecte deduse matematic în § 3.2.

- b) cu sistemul optic (S.O.1): se poate pune în evidență modificarea funcției h , în sensul liniarizării, a micșorării domeniului de scanare, a modificării dimensiunii spotului laser de-a lungul domeniului de măsurare, etc.

Problemele care au trebuit rezolvate anterior măsurătorile propriu-zise ale funcțiilor scanării țin de determinarea parametrilor geometrici ai procesului de scanare:

1⁰. **Determinarea parametrilor geometrici ai Og . poligonale:**

Cum numărul de laturi ai poligonului regulat este $n=5$, rezultă $\alpha = 180^\circ / n = 36^\circ$, adică unghiul care subîntinde jumătate din latura poligonului (v. §3.2).

Rezultă **domeniul unghiular** de scanare (fără S.O.1):

$$\text{Dom } \Theta = \Theta_{\max} - \Theta_{\min} = 2\alpha = 72^\circ$$

Se măsoară dimensiunea “b” la (v.fig.8.) a poligonului, de unde se obține **apotema poligonului** (care este și raza cercului înscris în acesta):

$$l_0 = 33,6 \text{ mm} \Rightarrow R = \frac{l_0}{1 + \sec \alpha} = 15,026 \text{ mm}$$

Latura poligonului rezultă:

$$l = 2R \cdot \operatorname{tg} \alpha = \frac{2l_0 \sin \alpha}{1 + \cos \alpha} = 21,83 \text{ mm}$$

(Prin verificarea directă, cu șublerul cu cadru, având valoarea diviziunii $v_d=0,05 \text{ mm}$, s-a obținut $l=21,95 \text{ mm}$).

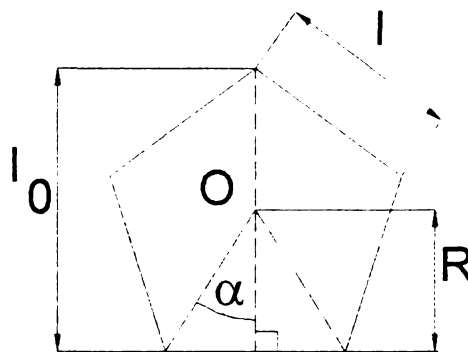


Fig.8.3

Fig.8.3 Determinarea parametrilor geometrici ai oglinzii poligonale

2^o. Determinarea curbei de etalonare a șurubului micrometric:

Reglarea excentricității „e” a razei laser fixe față de axa de rotație a oglinzi se realizează din șurubul micrometric Ș.M. (fig.8.2.a). Curba de etalonare reprezintă graficul funcției deplasării „s” a palpatorului micrometrului față de „e”.

Pentru eliminarea erorilor de histereză, corpul mobil, ce cuprinde motorul de antrenare și oglinda, sunt menținute în permanență în contact cu Ș.M prin arcul elicoidal a_e . Corpul mobil se deplasează, pentru modificarea lui „e”, pe două ghidaje (fig.8.2a).

Rezultatele experimentale $e(s)$ sunt trecute în tabelul 8.1, iar curba de etalonare este prezentată în fig.8.4.

Etalonarea capului micrometric

Tab.8.1

s	1	2	3	4	5	6	7	8
e	8,78	9,28	9,88	11,28	12,88	14,08	15,08	16,88

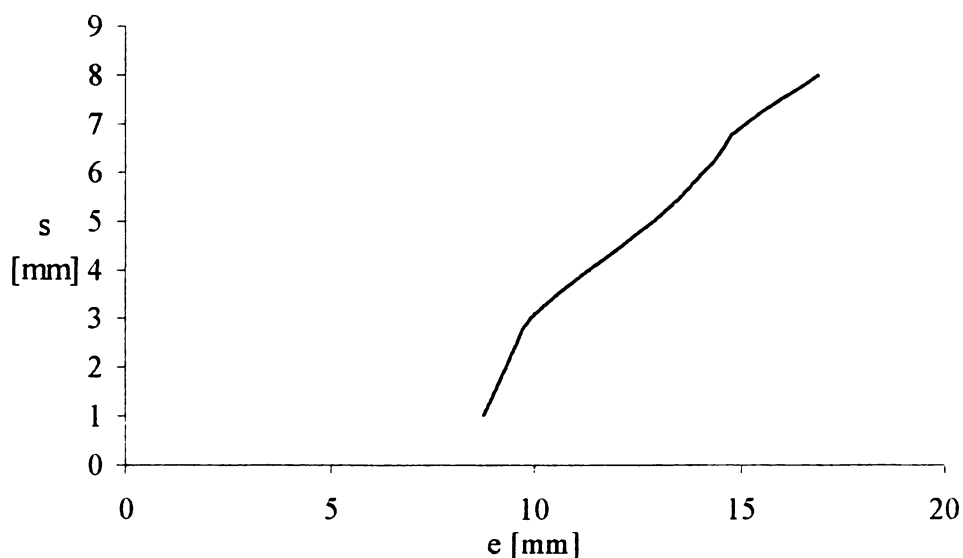


Fig.8.4 Curba de etalonare a dispozitivului micrometric

Determinarea funcției h este interesant să se facă pentru diferite valori ale excentricității e, alese funcție de discuția realizată în §3.2.

Cazul I: $e=10,59$ mm

În Tab.8.2 și fig.8.5, respectiv Tab.8.3 și fig.8.6 sunt prezentate rezultatele măsurătorilor, realizate conform fig.8.2, pentru respectiv situațiile: a) fără S.O; b) cu S.O.

S-a determinat nu funcția $h(\Theta)$, ci (v.fig.8.2), funcția $x(\Psi)$. x diferă de h și la fel Θ de Ψ , prin alegerea originilor, x și Ψ fiind alese convenabil, ținând doar seama de criteriul realizării unor măsurători cât mai simple utilizând standul experimental. În cazul II se va arăta modalitatea de "translatare" a originii axelor de coordonate, pentru a obține dependența dorită, $h(\Theta)$.

Concluzii:

- pentru a) –Tab.8.2, fig.8.5:

-domeniul unghiular maxim atins este inferior celui maxim posibil care ar putea fi atins:

$$\Psi_{\max} - \Psi_{\min} = 43^{\circ} - 5^{\circ} = 38^{\circ} < 2\alpha = 72^{\circ}$$

datorită gabariturii limitat (după direcția de scanare) a oglinzii fixe (Og, fig.8.1a), care rabate planul razelor laser cu 90° .

Se pot verifica însă, în vecinătatea oglinzii poligonale, unghiurile Ψ corespunzătoare începerii, respectiv sfârșitului parcurgerii unei fețe a poligonului. Rezultă domeniul total măsurat a lui Ψ (și, fiind vorba de o diferență, și a lui Θ):

$$\text{Dom. } \Psi = \text{Dom}\Theta = 59,5^{\circ} - (-18^{\circ}) = 72,5^{\circ},$$

așadar o valoare apropiată de cea previzionată teoretic, de $2\alpha = 72^{\circ}$ (v. § 3.2);

- diametrul spotului laser are, datorită reflexiei, o valoare și o variație destul de mare (v. discuția realizată în §1.2 referitor la coeficientul de apertură). Față de valoarea de 0,3 mm la ieșirea din sistemul optic S.O. laser(fig.8.1), valoarea maximă măsurată a diametrului este de 1,3 mm. Se verifică astfel aspectele punctate în literatura de specialitate și prezentate pe scurt în §1.2.

- se observă nelinearitatea caracteristicii $x_0(\Psi)$, care este de fapt $h(\Theta)$ translatată sus-jos și dreapta-stânga.

Rezultă astfel concordanța calitativă, la nivelul alurii curbilor, dintre rezultatele obținute analitic (v. § 3.2: fig.3.8) și cele experimentale.

Observație: Datorită limitării domeniului unghiular la doar o porțiune din cel total observabil, nelinearitatea curbei ce dă funcția de scanare este observabilă mai mult spre capetele domeniului unghiular analizat. În figura 8.9 însă, unde s-a obținut curba $x_0(\Psi)$ poziționând ecranul-riglă foarte aproape ($L_0=18$ mm) de Og. poligonale, astfel încât aproape întreg domeniul unghiular $\Theta_{\max} - \Theta_{\min} = 2\alpha$ să fie disponibil, se observă puternica nelinearitate a funcției de scanare spre marginile domeniului.

Evident, se poate analiza – funcție de parametrii specifici ai procesului de scanare – domeniul unghiular util maxim ce poate fi considerat astfel încât erorile de nelinearitate să fie menținute în limita impusă prin tema de proiectare –v. analiza realizată în acest sens în §3.2.

- pentru b) –Tabelul. 8.3, fig.8.6:

- domeniul unghiular maxim realizat pentru cazul cu S.O este:

$$\Psi_{\max} - \Psi_{\min} = 125^{\circ} - 67^{\circ} = 58^{\circ} < 2\alpha = 72^{\circ}$$

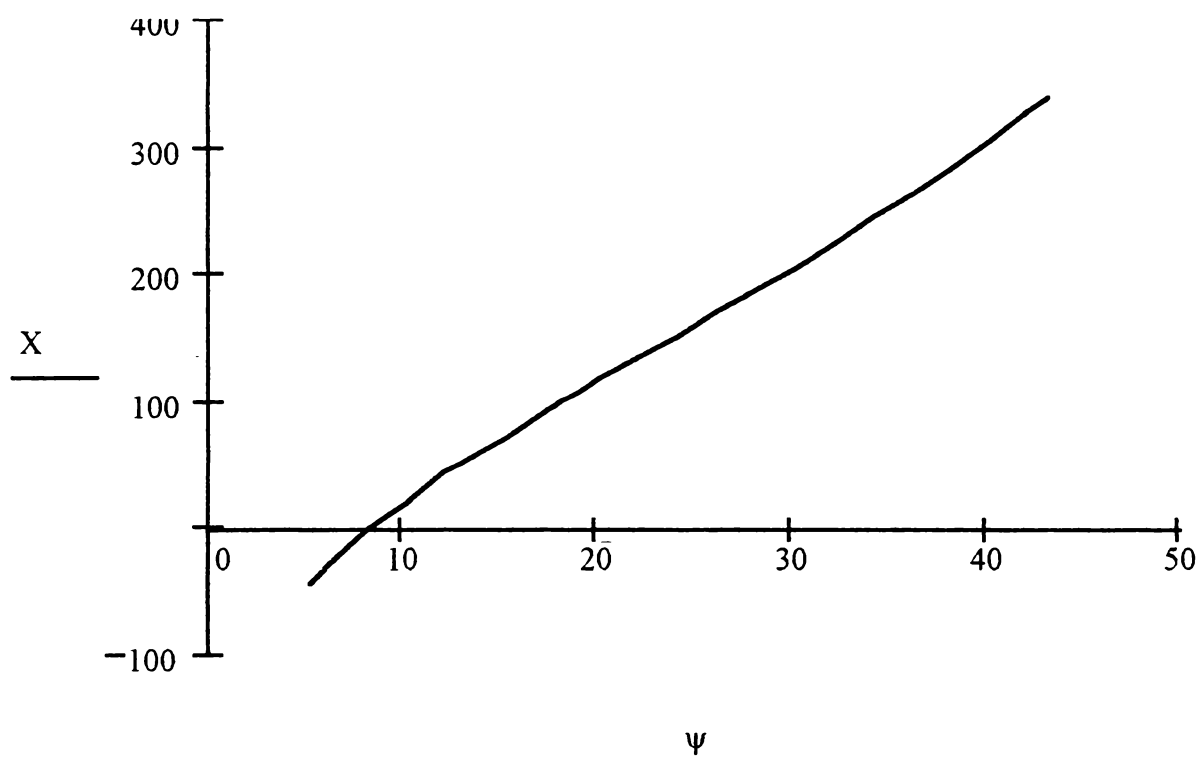


Fig.8.5 Curba $x_0(\Psi)$ pentru $e=10,59$ mm (cazul I, fără S.O.)

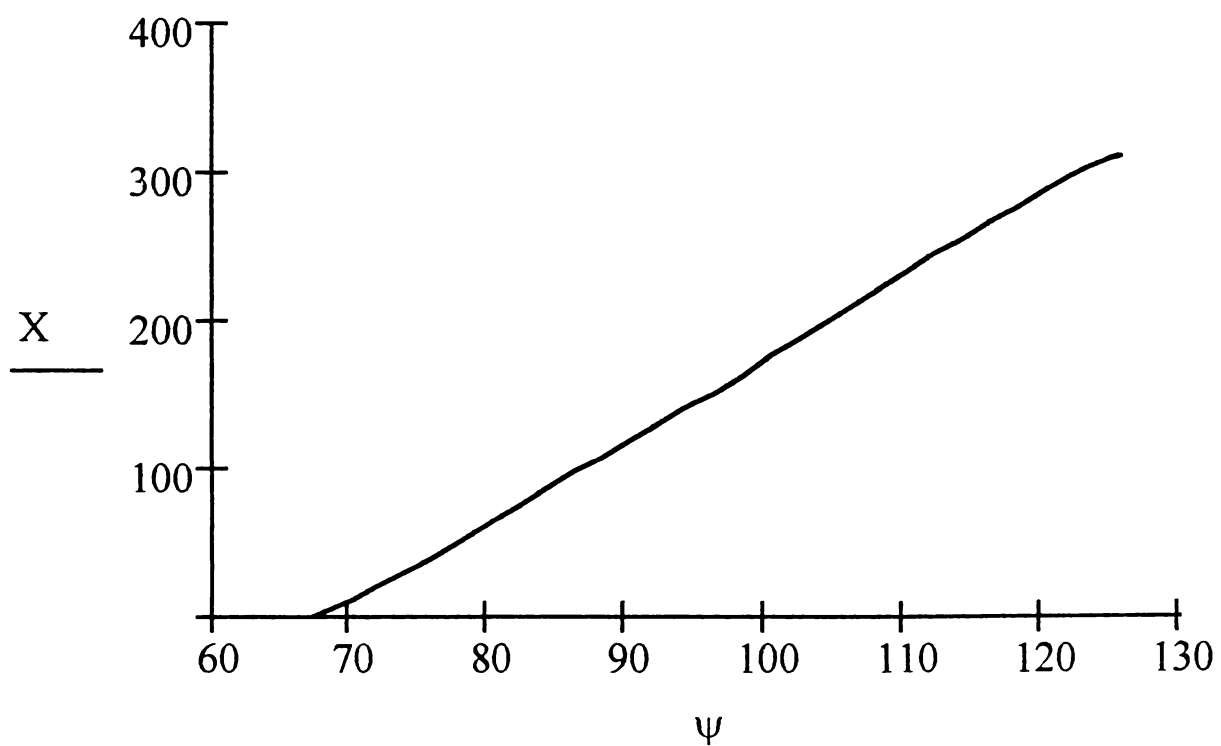


Fig.8.6 Curba $x(\Psi)$ pentru $e=10,59$ mm (cazul II, cu S.O.)

Se observă însă că în acest caz, față de a), se obține un domeniu unghiular mai mare. Rezultatul este ușor de înțeles dacă se observă că S.O. a fost interpus (v.fig.8.1) între Og. poligonală și Og. fixă, fapt care duce (fig.8.2a) la o mai bună utilizare a unghiului de rotație a oglinzii corespunzător parcurgerii unei fețe a poligonului. Gradul de acoperire η (§ 3.2) crește astfel și el, ceea ce constituie un prim **avantaj** al utilizării S.O. refractar.

Tab.8.2

$\Psi[^\circ]$	$x_0[mm]$
5	-46
6	-33
7	-18
8	-3
9	9
10	19,5
11	30,5
12	43
13	52,5
14	61,5
15	69,5
16	78,5
17	89,5
18	99,5
19	108
20	118,5
22	134,5
24	151
26	170,5
28	188
30	206
32	224
34	245,5
36	263
38	284
40	306
42	330
43	340

Tab.8.3

$\Psi[^\circ]$	$x[mm]$
67	0
70	11
72	21
74	30
76	40
78	51
80	62
82	73
84	84,5
86	96
88	106,5
90	118
92	128,5
94	140
96	150
98	161,5
100	175
102	185
104	197,5
106	208,5
108	221
110	231,5
112	244
114	254,5
116	264,5
118	276
120	287
122	296
123	300,5
125	309

- diametrul maxim al spotului în acest caz rămâne sub valoarea de 0,5 mm pe întreg intervalul, această focalizare a fascicolului fiind un alt avantaj și un alt considerent care impune folosirea S.O. Motivul principal însă pentru introducerea S.O refractar este faptul că:

- liniarizarea caracteristicii se observă că este foarte bine realizată prin utilizarea S.O. refractat. Are loc chiar o liniarizare atât de bună încât se observă din

diagrama din fig.8.6. că la capetele intervalului de măsurare unghiular – realizabil cu standul experimental - curba de scanare capătă o nelinearitate de concavitate inversă celei „originale”, fără S.O.

Este de menționat însă faptul că domeniul liniar necesar este corespunzător – în cazul analizat - lățimii unei coli de hârtie format A4 (210mm). Ori se observă că s-a obținut o caracteristică liniară pe un domeniu liniar chiar mai mare, de la $x_0=20$ mm la $x_0=288$ mm, așadar de 268 mm. Cerințele temei de proiectare pot fi deci cu ușurință satisfăcute.

- „simetrizarea” caracteristicii, ca domeniu unghiular, de o parte și de alta a axei optice (A.O) a S.O. Într-adevăr, se observă că poziția axei optice A.O. este la $x=150$ mm (corespunzător – v. Tab.8.3 la $\Psi=96^\circ$), la Δ axe =8mm de axa Og. poligonale: $x(\text{axă Og. poligonală})=158$ mm.

Se poate realiza astfel discuția referitoare la unghiurile caracteristice $\Theta_{1,2}$ și $\Theta_{\min, \max}$ (§ 3.2), precum și obținerea funcției de scanare $h(\Theta)$.

Este preferabil însă ca această discuție să se facă pentru o altă valoare a excentricității „e”.

Într-adevăr, se observă că, pentru „e” ales:

$$\begin{cases} \Theta_{\min} = \arcsin \frac{e \cos \alpha}{R} - \alpha = 34,74^\circ - 36^\circ = -1,26^\circ < 0 \\ \Theta_{\max} = \arcsin \frac{e \cos \alpha}{R} + \alpha = 34,74^\circ + 36^\circ = 70,74^\circ \end{cases}$$

Aspectul se verifică și experimental prin aceea că, pentru începerea scanării unei fețe a poligonului, raza reflectată „cade” sub raza laser fixă. Este imposibil așadar de regăsit în spațiul scanat întreg domeniul unghiular al razelor reflectate.

Pentru a obține aceasta, este necesar să se respecte condițiile (§3.2):

$$0 < \Theta_{\min} < \frac{\pi}{4} < \Theta_{\max} < \frac{\pi}{2}, \text{ care conduc la:}$$

$$0,997 = \left| 1 - \frac{e\sqrt{2}}{R} \right| < \operatorname{tg} \alpha < \frac{e}{R} < 1.$$

Se observă că în cazul anterior, cu $e=10,59$ mm, $e/R=0,705 < 1$, dar $e/R < \operatorname{tg} \alpha = 0,7265$, așadar nu este respectată condiția menționată la limita ei inferioară, ceea ce duce la faptul că $\Theta_{\min} < 0$, situație neconvenabilă realizării complete a studiului. S-a ales de aceea o altă valoare a lui „e”, care să satisfacă relația dublei inegalități prezentate – v. Cazul II.

Cazul II: $e=13,58$ mm; $L_0=268$ mm

În acest caz, se obține (cum $R=15,024$ mm):

$$\frac{e}{R} = 0,904 < 1 ; \left| 1 - \frac{e\sqrt{2}}{R} \right| = 0,278 < 0,726 \text{ și } \frac{e}{R} > \operatorname{tg} \alpha = 0,767 \text{ așadar este}$$

respectată în totalitate condiția constructivă necesară.

În Tab.8.4 și fig.8.7 sunt prezentate rezultatele măsurătorilor $x(\Psi)$ - cu S.O.

Se observă că sunt valabile și în acest caz **concluziile** obținute în cazul I referitoare la:

- **domeniul unghiular:**

• pentru a):

$$\Psi_{\max} - \Psi_{\min} = 114^\circ - 72^\circ = 36^\circ$$

• pentru b)

$$\Psi_{\max} - \Psi_{\min} = 122^\circ - 66^\circ = 56^\circ$$

- În plus, valorile obținute se observă că nu variază semnificativ cu modificarea lui „e”, deși, așa cum era de așteptat (v.fig.8.1b), domeniul unghiular scade cu apropierea oglinzii de ecranul E.

- **diametrul spotului fascicolului laser** în planul riglei:

Se atinge pentru cazul a) tot valoarea de 1,3 mm (maximă), în timp ce pentru cazul b), spotul rămâne puternic colimat.

Este interesant că, realizând în vecinătatea oglinzii poligonale ($L=18$ mm) măsurătorile, pentru determinarea domeniului unghiular total se obține:

$$\Psi(\Theta_{\min}) = 59^\circ ; \Psi(\Theta_{\max}) = 137^\circ \Rightarrow \text{Dom } \Psi = 78^\circ > 2\alpha = 72^\circ$$

Diferența corespunde extinderii aparente a domeniului unghiular datorită măririi dimensiunii (alungirii) spotului laser după direcția de scanare.

Realizând o serie de măsurători $x_0(\Psi)$ în imediata vecinătate a oglinzii poligonale (cu un ecran –riglă situat la distanța $L_0=18$ mm de raza laser fixă –evident fără S.O.), se obțin rezultatele din Tab.8.6 și fig.8.9. S-au determinat valorile x_0 ale poziției centrului spotului laser deoarece, în conexiune cu discuția de mai sus, acesta ajunge la o dimensiune de 4 mm pentru $\Psi = 132^\circ$ (sau $x_0 = 40$ mm), pentru valori superioare ale lui Ψ , dimensiunea spotului crescând în continuare. Valoarea minimă atinsă, la $\Psi = 120^\circ$ (sau $x_0 = 30$ mm) a fost în acest caz de 1,5 mm.

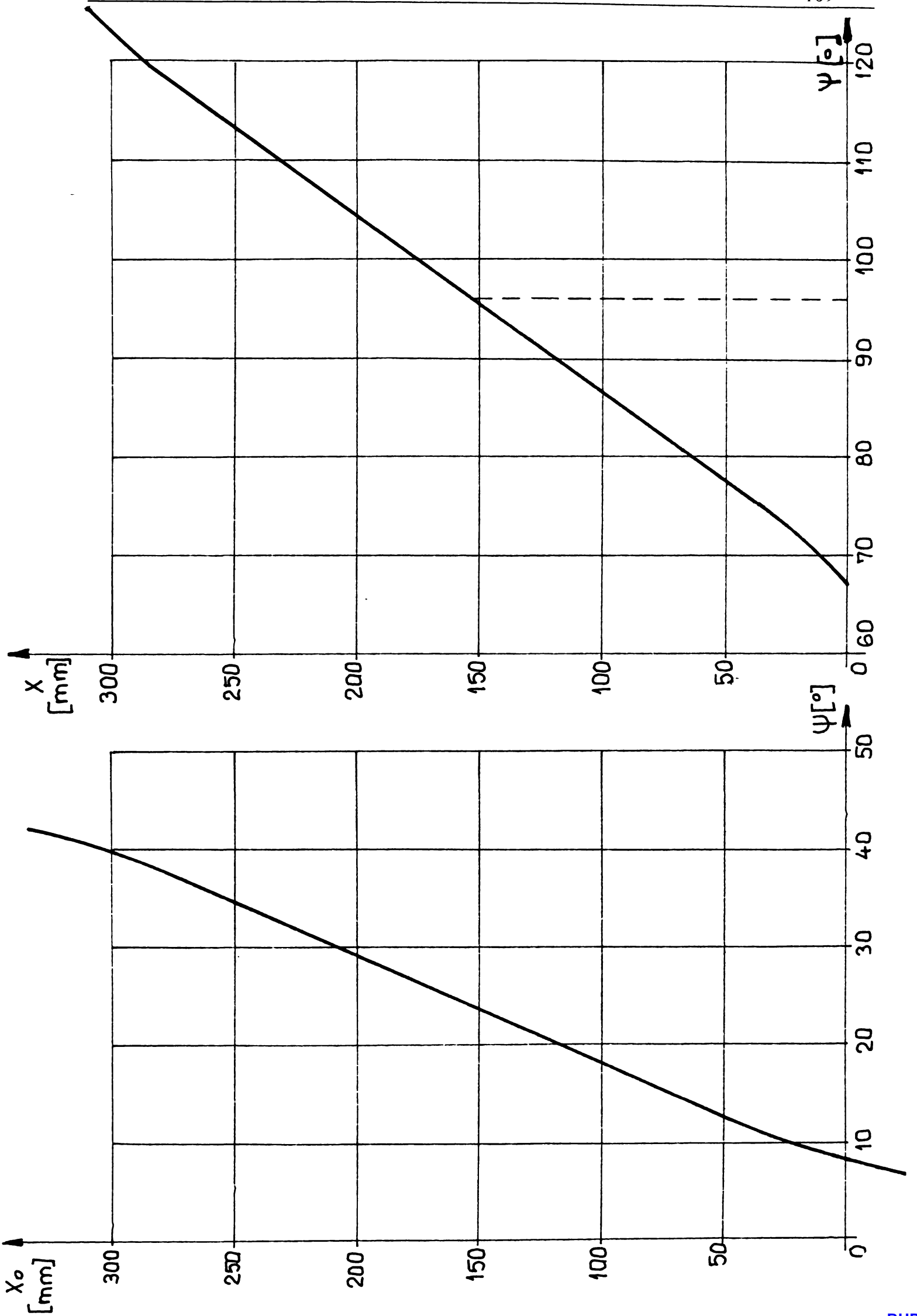
Rezultă și din acest criteriu o condiție de alegere constructivă a dimensiunii minime a distanței L. Cu cât aceasta crește, spotul laser rezultă mai colimat (până în planul focal al S.O. -v.fig.8.2.a): L(sau L_0) nu pot fi astfel alese oricât de mici datorită dimensiunilor mari și variațiilor mari ale dimensiunii spotului laser în direcția de scanare.

- **Liniarizarea funcției de scanare:** caracterul neliniar destul de pronunțat al funcției $x_0(\Psi)$ - obținută fără S.O. – este atenuat și eliminat prin introducerea S.O. refractant.

Ca și în cazul I, corectarea nelinearității se observă că duce (fig.8.8) chiar la o nelinearitate de concavitate inversă, dar numai pe porțiuni foarte mici și strict la capetele domeniului scanat (porțiuni care oricum nu sunt utilizate – sunt eliminate - la punerea în stație a dispozitivului).

De asemenea, conform și discuției de la cazul I, alegerea lui L(fig.8.1b, fig.8.2) este importantă. Din determinările făcute în vecinătatea Og. poligonale ($L=18$ mm), fără S.O. (Tab.8.6, fig.8.9), s-a putut vedea creșterea puternică a nelinearității funcției de scanare în acest caz (pe lângă modificările dimensiunii spotului laser).

Important! Realizarea unei caracteristici de scanare liniare duce (v. discuția din § 3.2) la rezolvarea problemei caracteristicii de funcționare de două variabile. Caracteristica va rezulta convenabil, uniparametrică, depinzând acum doar



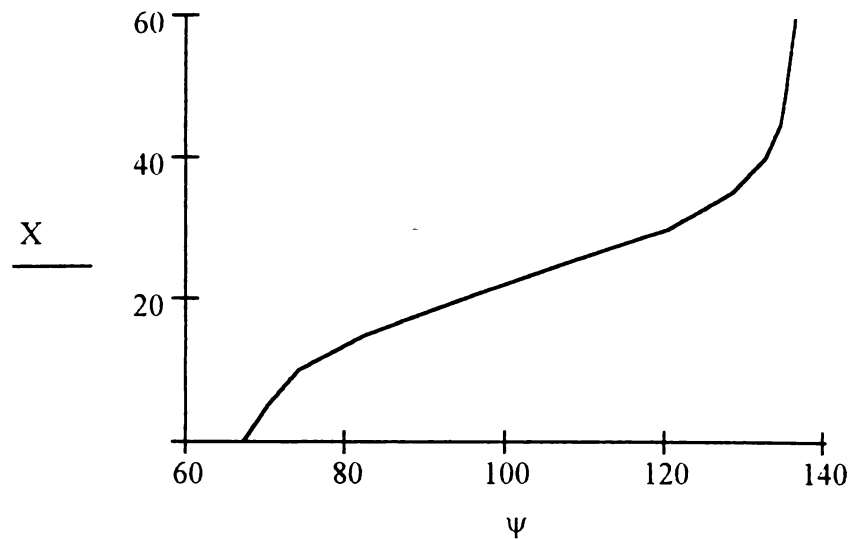


Fig.8.9 Curba $x_0(\Psi)$ pentru $e=13,58$ mm (cazul II) - fără S.O. și pentru $L=18$ mm de dimensiunea „d” a măsurandului după direcția de scanare și nu și de poziționarea acestuia în spațiul scanat.

Observație: Față de schema de măsurare considerată în fig.3.1,3. , se poate considera și o altă variantă: fără S.O. 1,2, dar utilizând o linie de fotodectoare poziționată (pixel cu pixel) corespunzător în spatele măsurandului. Spațierea pixelilor ar urmări –în acest caz legea de scanare – funcția $h(\Theta)$ –indiferent de nelinearitatea ei. Este preferată însă varianta cu S.O.1 proiectat special astfel încât să înlătore nelinearitatea și de asemenea cu S.O.2., pentru a utiliza, convenabil, un singur fotodetector.

Determinarea parametrilor de funcționare ai dispozitivului

În cazul II, din §3.2 rezultă unghiurile caracteristice ale dispozitivului:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Theta_{\min} = \arcsin \frac{e \cdot \cos \alpha}{R} - \alpha = 47^\circ - 36^\circ = 11^\circ \\ \Theta_{\max} = \arcsin \frac{e \cdot \cos \alpha}{R} + \alpha = 47^\circ + 36^\circ = 83^\circ \end{array} \right.$$

Cu relația (3.54), se poate determina atunci poziția față de A.O. a limitelor inferioare și superioare a câmpului domeniului de scanare:

$$\left\{ \begin{array}{l} h(\Theta_{\min}) = R\sqrt{2} - e - \frac{R}{\cos \Theta_{\min}} + e \cdot \operatorname{tg} \Theta_{\min} - L_0 \cdot \operatorname{ctg} 2\Theta_{\min} = -668,36 \text{ mm} \\ h(\Theta_{\max}) = R\sqrt{2} - e - e - \frac{R}{\cos \Theta_{\max}} + e \cdot \operatorname{tg} \Theta_{\max} - L_0 \cdot \operatorname{ctg} 2\Theta_{\max} = 1071,41 \text{ mm} \end{array} \right.$$

Rezultă astfel dimensiunea maximă posibilă a domeniului liniar scanat:

Domeniul $h = h(\Theta_{\max}) - h(\Theta_{\min}) = 1739,77$ mm, cu observația că domeniul util (cel în care funcția de scanare h este liniară sau cel puțin liniarizabilă) este mult mai mic.

Funcția de scanare $h(\theta)$ rezultă din funcția $x(\Psi)$ determinată parcurgând următoarele etape (tab.8.7):

- se determină unghiurile Θ_{\min} , Θ_{\max} prin calcul;

Tab.8.4.

$\Psi[^\circ]$	$x_0[\text{mm}]$
78	-46
80	-18,5
82	8
84	34
86	55,5
88	73,5
90	93
92	110,5
94	128,5
96	146
98	165
100	181,5
102	199
104	219
106	241
108	261
110	280
112	302
114	330

Tab.8.5.

$\Psi[^\circ]$	$x[\text{mm}]$
66	-8
68	2,5
70	10,5
72	21,5
74	30,5
76	41,5
78	51,5
80	61
82	70,5
84	82
86	93,5
88	104,5
90	115,5
92	126
94	138
96	150,5
98	161
100	173
102	183,5
104	196
106	208
108	218,5
110	230
112	240,5
114	251
116	262
118	271
120	282,5
122	293

Tab.8.6.

$\Psi[^\circ]$	$x_0[\text{mm}]$
67	0
70	5
74	10
82	15
94,5	20
107	25
120	30
128	35
132	40
134	45
135	50
136	60

- se determină unghiurile corespondente Ψ_{\min} , Ψ_{\max} la care începe, respectiv se termină scanarea unei fețe.

Experimental rezultă $\Psi_{\max} = 134^\circ$; $\Psi_{\min} = 62^\circ$. Se observă că $\Psi_{\max} - \Psi_{\min} = 72^\circ$, așadar s-a obținut concordanța cu valoarea calculată, $2\alpha = 72^\circ$;

- se pun în corespondență unghiurile care marchează limitele domeniului maxim liniat scanat: Ψ_{\min} cu Θ_{\min} și Ψ_{\max} cu Θ_{\max} (v.Tab.8.7)

- se determină unghiul Ψ pentru care $\Theta = 45^\circ$, așadar $h=0$; din tab.8.7, $\Psi(\theta=45^\circ)=96^\circ$.

- se face corespondența între x_0 și h_{exp} ținându-se seama că $h_{\text{exp}}=0$ pentru $\Theta = 45^\circ$. Din șirul x_0 se obține atunci h_{exp} după formula:

$$h_{\text{exp}}(\Theta) = x_0(\Theta) - x_0(\Theta = 45^\circ)$$

valorile fiind trecute în tab.8.8.

- se determină valorile funcției h prin calcul, cu relația (3.54), pentru domeniul unghiular $\text{Dom } \Theta$ considerat;

- se confruntă cele două șiruri de valori, respectiv cele două diagrame obținute, h_{exp} și h_{calc} .

Concluzii: Din tab.8.8 și fig.8.10 se observă gradul de concordanță al rezultatelor experimentale cu cele teoretice.

Tab.8.7

Ψ	$\Psi(\theta_{\min})=62^\circ$	78°	96°	114°	$\Psi(\theta_{\max})=134^\circ$
θ	$\theta_{\min}=11^\circ$	27°	45°	63°	$\theta_{\max}=83^\circ$
x_0		-46	146	330	
h_{exp}		-192	0	184	
h_{calc}	-668,32	-196,98	0	195,93	1069,86

Tab.8.8

ψ [°]	x_0 [mm]	θ [°]	h_{exp} [mm]	h_{calc} [mm]
78	-46	27	-192	-196.988143
80	-18.5	29	-164.5	-169.4475346
82	8	31	-138	-144.1983009
84	34	33	-112	-120.7488104
86	55.5	35	-80.5	-98.7085904
88	73.5	37	-72.5	-77.75911679
90	93	39	-53	-57.63316761
92	110.5	41	-35.5	-38.09970205
94	128.5	43	-17.5	-18.95232017
96	146	45	0	0
98	165	47	19	18.94081463
100	181.5	49	34.5	38.05349278
102	199	51	53	57.52848456
104	219	53	63	77.57120029
106	241	55	95	98.41121415
108	261	57	115	120.3137119
110	280	59	134	143.5944739
112	302	61	156	168.6403184
114	330	63	184	195.9380123

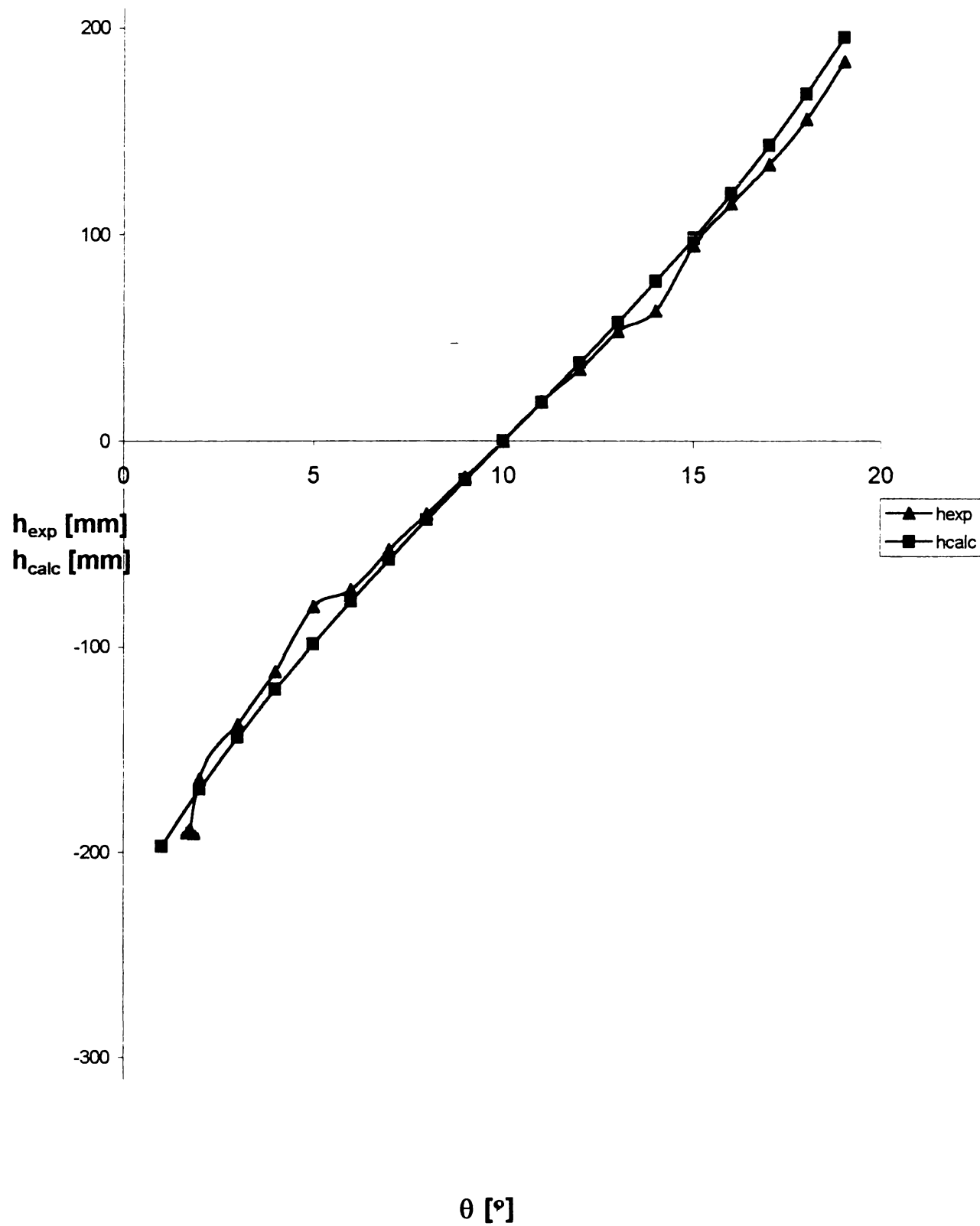


Fig. 8.10 Funcția de scanare h_{exp} și h_{calc} pentru oglinda poligonală (cazul II)

8.2. Dispozitive de scanare cu oglindă plană rotitoare

Pentru determinarea funcției de scanare pe cale experimentală se utilizează standul având schema de principiu reprezentată în fig.8.11.

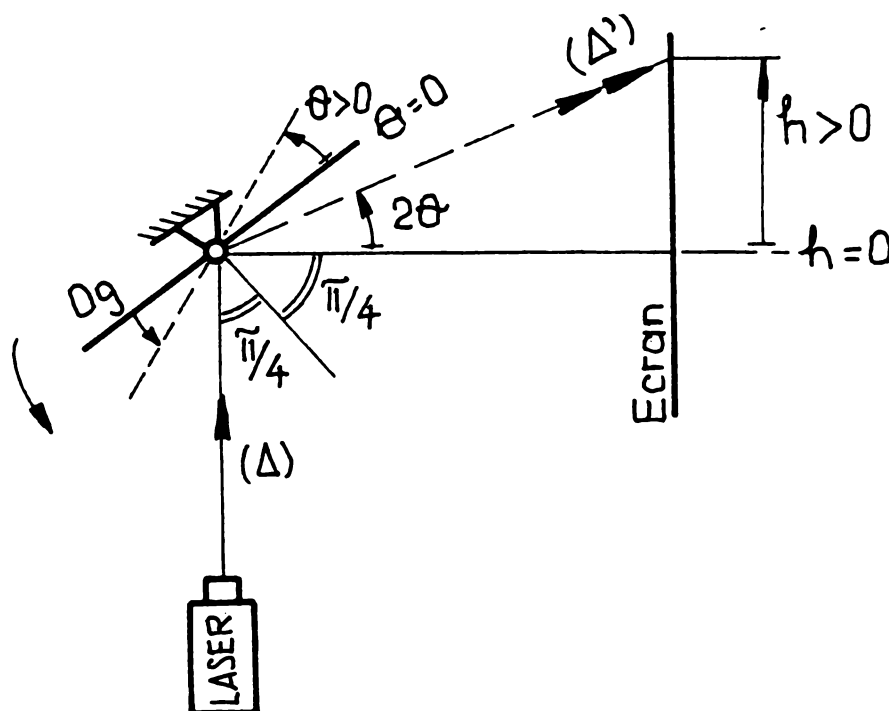


Fig.8.11. Schema de principiu a standului experimental pentru testarea dispozitivelor de scanare cu oglinzi plane rotitoare

Se realizează măsurătorile față de poziția de $h=0$ a oglinzii (înclinată cu $\pi/4$ față de direcția razei laser – fig.8.11.b).

S-au realizat măsurătorile pentru trei valori distincte ale parametrului L =distanța de la axa de rotație a oglinzii (conținută în planul suprafeței reflectante). Se observă respectarea alurii deduse analitic în studiul matematic din paragraful 3.1.

Din diagramele rezultate (familia de curbe din fig.8.12) se observă curbarea progresivă a curbei funcției de scanare cu micșorarea lui L și invers, mărirea gradului de liniaritate a lui $h(\theta)$ cu mărirea lui L . S-a regăsit așadar și în acest caz particular (cu $R=0$) al oglinzii poligonale aceeași concluzie ca și în studiul realizat în paragraful anterior (§8.1): **aplicațiile de proximitate necesită sistem optic refractant (inclusiv pentru liniarizarea caracteristicii), pe când în aplicațiile de scanare la distanță, această liniarizare este realizată prin mărirea lui L .**

Pentru una din valorile parametrului, $L_2=176$ mm, s-a realizat și calculul analitic a funcției $h(\theta)$, în tab.8.9. fiind prezentate comparativ valorile obținute, iar în fig.8.13, curbele funcțiilor de scanare h_{calc} și h_{exp} realizate.

Se observă concordanța realizată, în limita erorilor de măsurare, dintre curba determinată experimental și cea realizată analitic.

Tab.8.9

θ [g]	$L_1=252$ mm		$L_2=176$ mm		
	x [mm]	h_{exp} [mm]	x [mm]	h_{exp} [mm]	h_{calc} [mm]
-22	—	—	302	-152	-169.9612244
-20	—	—	289	-139	-147.6815351
-18	—	—	273	-123	-127.8714849
-16	298	-148	256	-106	-109.9770059
-14	278	-128	240	-90	-93.58085997
-12	257	-107	226	-76	-78.36024861
-10	238	-88	214	-64	-64.05876123
-8	220	-70	200	-50	-50.46718789
-6	203	-53	187	-37	-37.40995485
-4	185	-35	175	-25	-24.73518691
-2	168	-18	163	-13	-12.3071189
0	150	0	150	0	0
2	131	19	136	14	12.3071189
4	113	37	124	26	24.73518691
6	98	52	113	37	37.40995485
8	78	72	103	47	50.46718789
10	58	92	85	65	64.05876123
12	37	113	68	82	78.36024861
14	15	135	54	96	93.58085997
16	—	—	36	114	109.9770059
18	—	—	20	130	127.8714849
20	—	—	-5	155	147.6815351

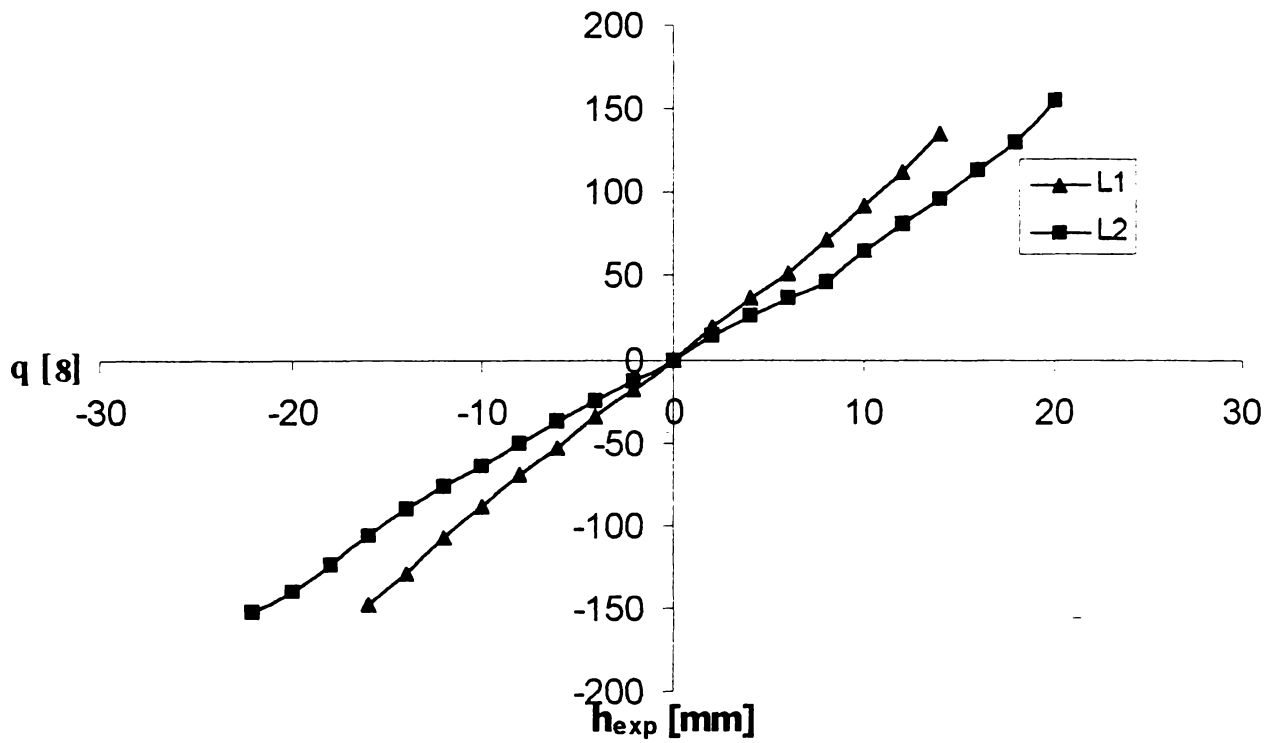


Fig.8.12 Funcția de scanare h_{exp} pentru două valori ale lui L (DS cu og. plană rotitoare)

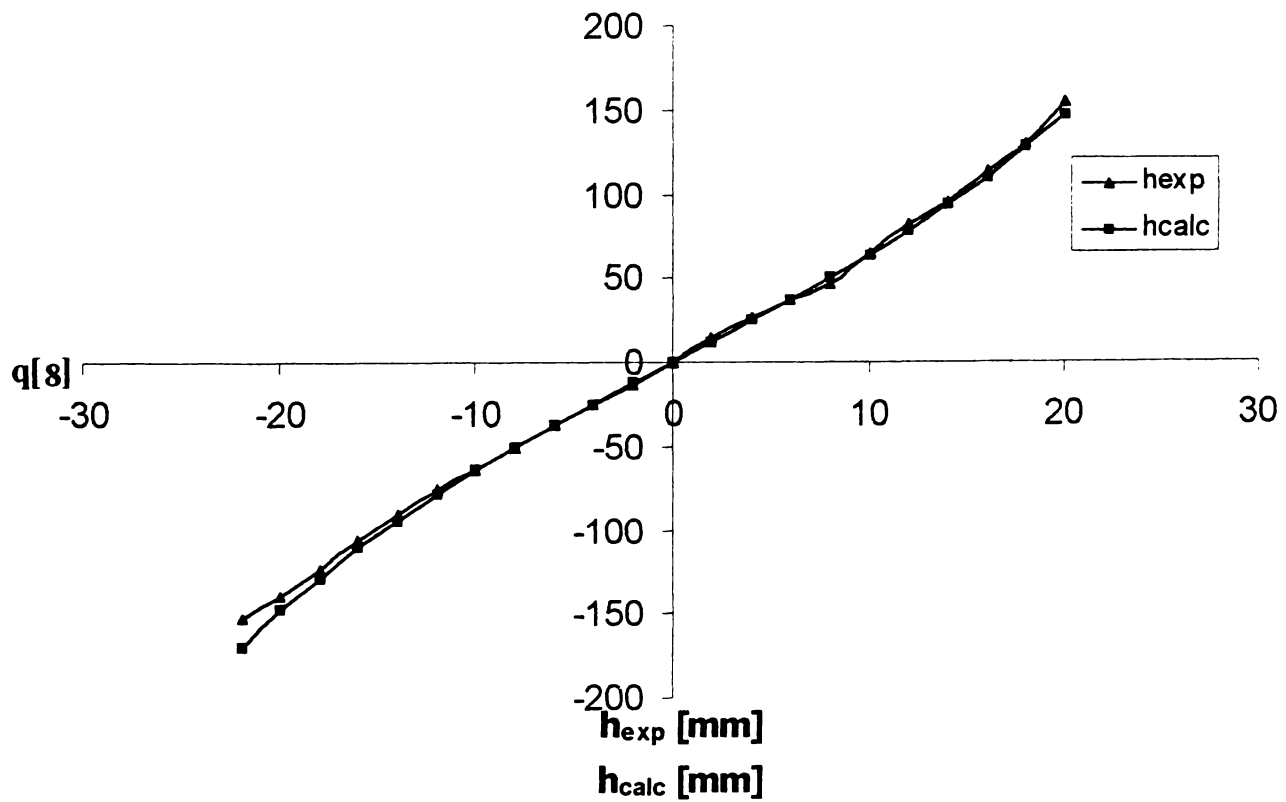


Fig.8.13 Funcția de scanare h_{exp} și h_{calc} (DS cu og. plană rotitoare)

8.3. Uni-cama optică

Determinările experimentale pentru acest caz s-au realizat utilizând standul experimental din fig.8.14.

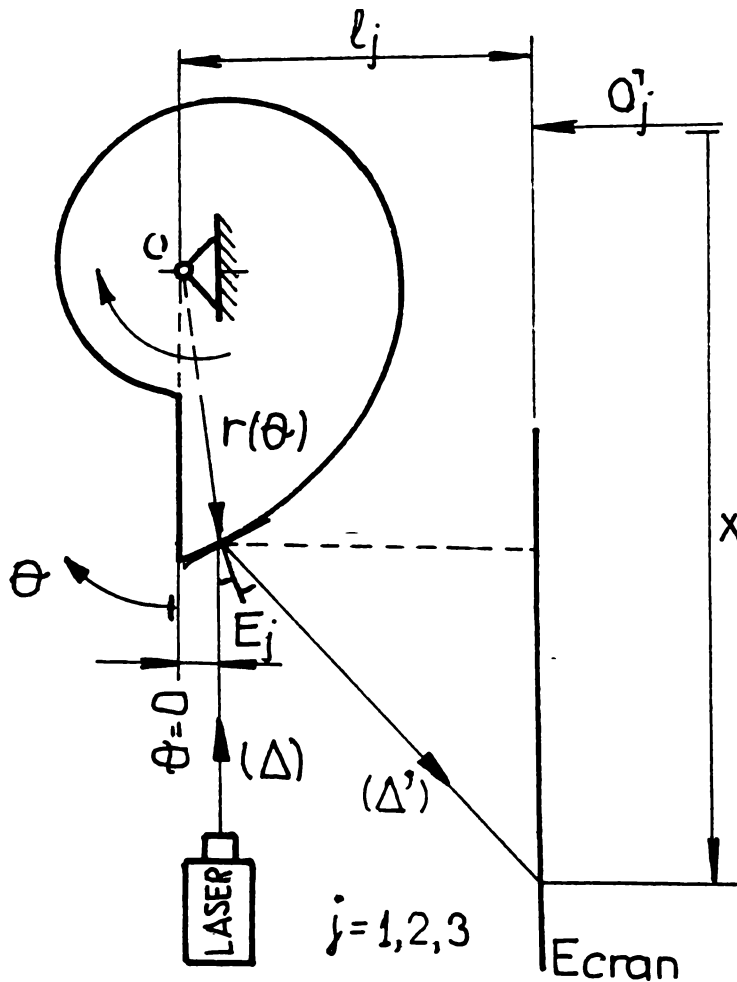


Fig.8.14 Schema de principiu a standului experimental pentru studiul camei optice

reflectate (Δ'). Această rază este în permanență paralelă cu o direcție fixă, dată de ec. (3.179) datorită proprietății spiralei logaritmice ca tangenta să facă același unghi cu raza vectorie în fiecare punct al spiralei. Existența soluției optime, foarte simple, realizabilă ca multi-camă cu profilul unei fețe dat de ecuația (3.181) face însă studiul mai puțin util.

Concluzia este că multi-cama optică cu profilul unei fețe de ecuație:

$$r(\theta) = r_0 e^{-\theta} \quad (3.181)$$

prezintă maximum de avantaje funcționale (v. §3.3) în condițiile obținerii unei simplități constructive a dispozitivului de scanare care în acest caz nu mai necesită sistemul optic refractant, fiind constituit doar din capul de scanare rotitor.

Posibilitatea de a obține în acest caz însă gabarite exagerate datorită funcției exponențiale impune însă o discuție asupra numărului de fețe "n" necesar de considerat pentru multi-camă. Din tab.8.11 se observă ca acesta nu poate fi considerat prea mic, deoarece raza maximă a unei fețe rezultă de $e^{2\alpha}$ mai mare decât raza minimă. În aceste condiții, abia valori mari ale lui n, de tipul $n=32$ fețe, se dovedesc fezabile pentru celelalte raza laser este chiar obturată de partea camei de rază maximă.

S-au făcut trei serii de măsurători pentru trei valori ale excentricității E. De asemenea, distanța l până la Ecranul-riglă a trebuit reglată corespunzător.

Cama utilizată este prezentată ca profil în fig.8.15, iar ca fotografie a piesei executate, în fig.8.16. S-a utilizat o ecuație diferită de cea optimă (3.181), determinată în §3.3, pentru care raza (Δ') reflectată rămâne în permanență perpendiculară pe raza fixă (Δ) – fig.3.24. Pentru o altă ecuație (v. fig.8.15) decât cea din rel. (3.181) însă, se observă că indiferent de felul în care se alege E, caracteristica $\Delta x(\theta)$ (fig.8.17, tab.8.10), identică până la o constantă aditivă cu $\chi(\theta)$, este, dificil de optimizat, chiar neconvenabilă.

O optimizare este desigur posibilă considerând însă ecranul perpendicular pe direcția razei

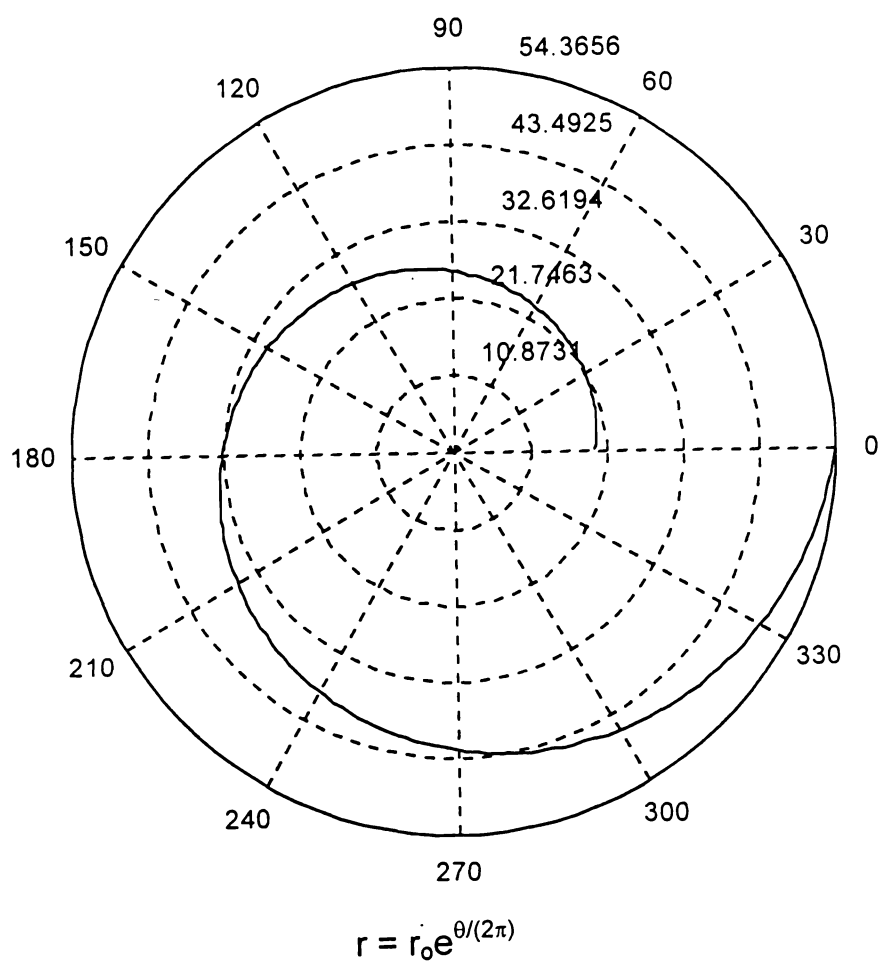


Fig.8.15 Realizarea profilului unicamei optice ca spirală logaritmică

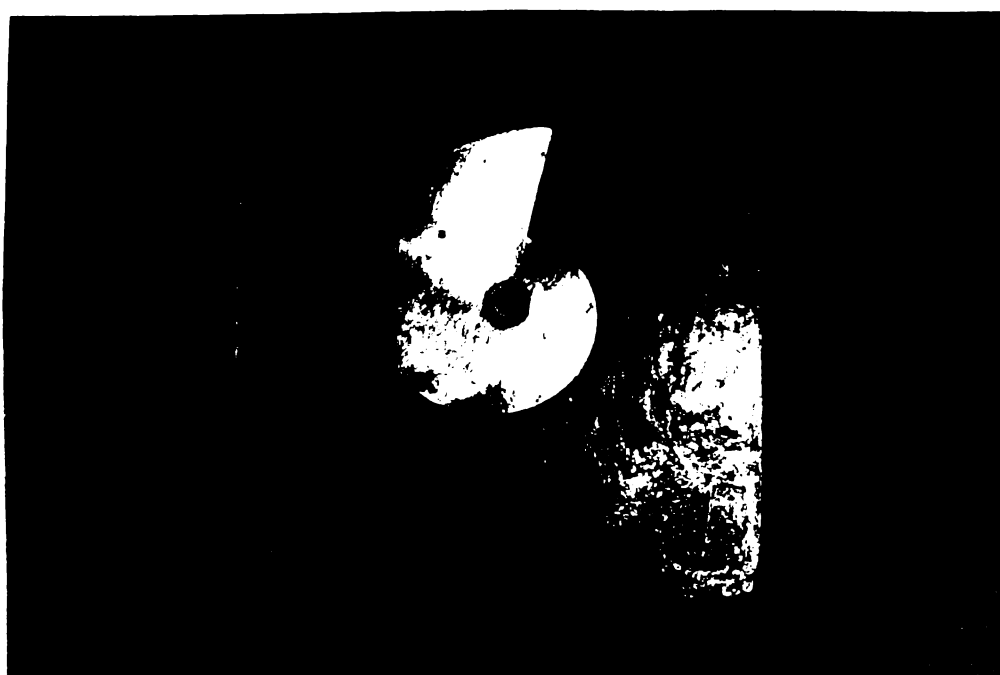


Fig.8.16 Uni-cama optică - foto

Tab.8.10

θ [g]	$E_1=15$ mm	$E_2=20$ mm	$E_3=11$ mm
	$x(E_1)$ [mm]/ Δx	$x(E_2)$ [mm]/ Δx	$x(E_3)$ [mm]/ Δx
0	265/0	215/0	245/0
10	262/3	213/2	242/3
20	260/5	210/5	241/4
30	258/7	203/12	240/5
40	254/11	195/20	240/5
50	245/20	182/33	235/10
60	240/25	180/35	230/15
70	237/28	174/41	225/20
80	232/33	170/45	222/23
90	230/35	166/49	220/25
100	224/41	155/60	218/27
110	218/47	130/85	213/32
120	208/57		208/37
130	200/65		201/44
140	193/72		193/52
150	182/83		182/63
160	175/91		177/68
170	172/94		172/73
180	167/99		172/73
190	165/101		
200	155/111		
210	150/116		

Tab.8.11

n	$2\alpha=2\pi/n$	$e^{2\alpha}$
5	$2\pi/5$	3,51
10	$\pi/5$	1,87
32	$\pi/16$	1,217

Domeniul de scanare pentru cazul $n=32$ rezultă, cu rel. (3.187):

$$\text{Dom}\chi = \sqrt{a^2 - E^2} + \sqrt{a^2 e^{4\alpha} - E^2} = 42,02 \text{ mm}$$

unde s-a considerat $a=20$ mm; $E=8$ mm.

A rezultat așadar nu domeniul de scanare bun (de exemplu pentru măsurători dimensionale comparative), în condițiile obținerii avantajelor discutate anterior.

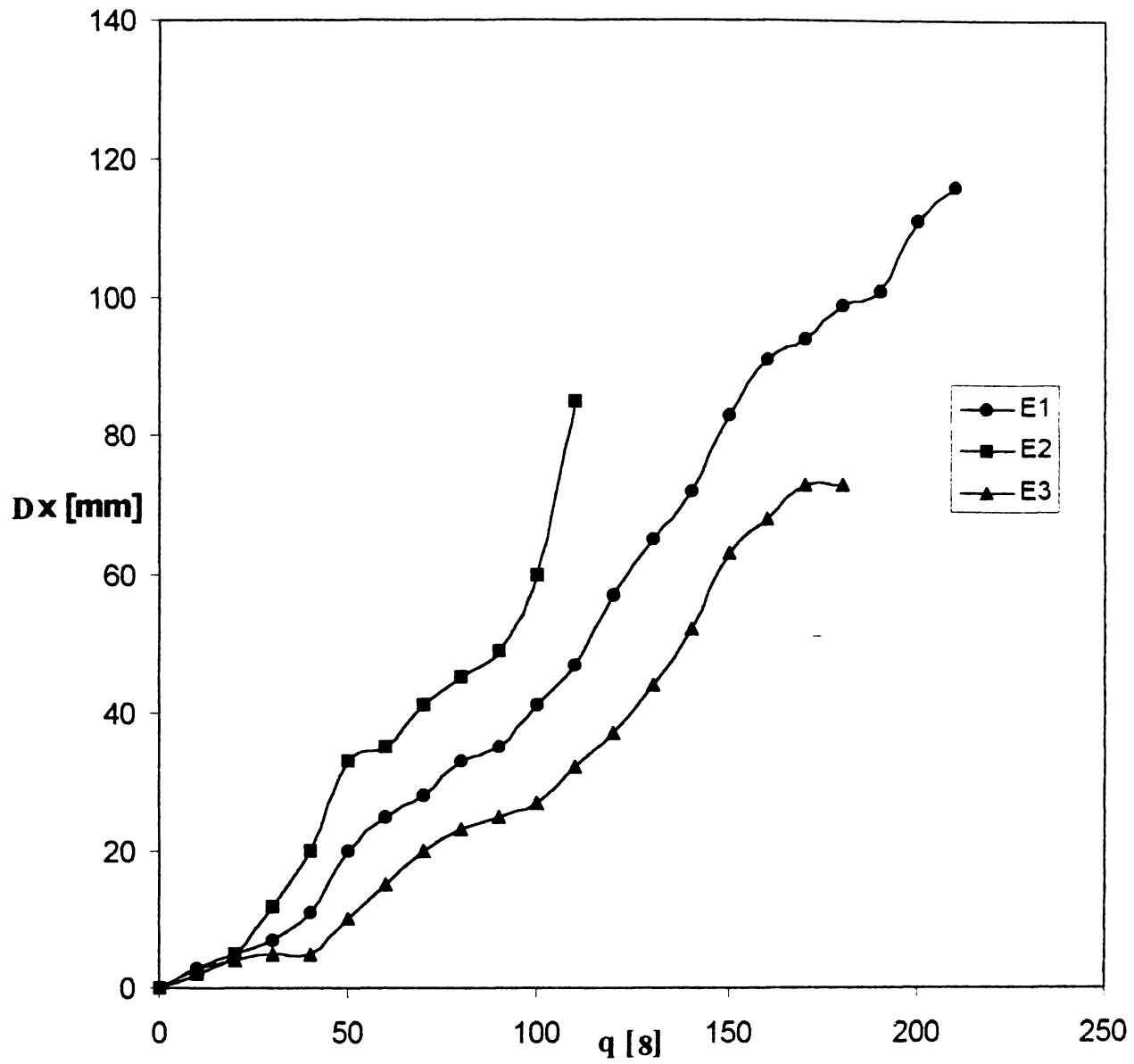


Fig.8.17 Curba $\Delta x(\theta)$ (funcția de scanare translataă) pentru trei configurații ale sistemului de scanare cu uni-camă optică

Capitolul 9

CONCLUZII. CONTRIBUȚII PERSONALE

9.1. Concluzii

Din Partea I, cuprinzând stadiul actual în ceea ce privește dezvoltarea și utilizarea tehnicilor și dispozitivelor de scanare, unele integrate în sisteme de măsurare deosebit de sofisticate și pretențioase (vezi microscopia prin scanare, scanarea din satelit, etc.) se observă largă utilizare la ora aceasta a acestor metode și aparate.

Deși accentul s-a pus pe dispozitivele de scanare (DS) optice, în particular cele laser, se poate ușor vedea că aspectele prezentate au o referire mai largă, scanarea putând fi și mecanică, termică, electromagnetică, acustică, etc. Principiile utilizate se regăsesc, sunt aceleași, aparatura trebuie doar adaptată corespunzător.

DS laser au însă avantaje care le-au impus în prezent în marea majoritate a aplicațiilor, avantaje legate în principal de proprietățile cunoscute ale surselor laser: monocromaticitate, intensitate, dar mai ales directivitate.

Aria aplicațiilor este, după cum s-a văzut din prezentarea selectivă făcută în Capitolul 2, extrem de extinsă. Ceea ce este și mai important însă pentru viitorul dispozitivelor de scanare este faptul că acestea sunt efectiv “pentru toate buzunarele”: de la cele mai ieftine (portabile, pentru scanarea codurilor de bare), la cele cu performanțe ridicate de rezoluție, viteză și, eventual, domeniu scanat. Caracteristicile sunt date, cel puțin în ceea ce privește domeniile generale de variabilitate, în prezentarea făcută în Capitolul 2.

La o asemenea arie largă de aplicații, numărul soluțiilor constructive și de principiu dezvoltate este pe măsură. În **Capitolul 1** se încearcă cuprinderea lor în cea mai mare măsură precum și sistematizarea tipurilor existente, după ce în prealabil, în **Introducere** s-a realizat o clasificare cât se poate de exhaustivă a lor.

*

Lucrarea s-a centrat în Partea a II-a, de analiză și sinteză a DS, pe câteva din soluțiile care se dovedesc cele mai utilizate în practică: scanerele rotative și scanerele oscilante.

Din Capitolul 3, prin studiul matematic realizat pentru scanerele monogon și poligon (rotative), s-au putut decela caracteristicile, limitele și avantajele fiecăreia. S-au putut obține ca și concluzii, din analiza efectuată, relațiile necesare între parametrii constructivi și funcționali ai fiecărei soluții.

Pentru varianta monogon a rezultat, ca o soluție posibilă, o construcție în oglinzi-unghi, pe baza aprofundării unei probleme din optica geometrică. Este una din posibilitățile de materializare a unui deziderat rezultat din studiul matematic: obținerea unei caracteristici liniare de funcționare.

Varianta scannerului poligonal a pus, comparativ, mai multe probleme de rezolvat, liniarizarea caracteristicii fiind numai una dintre ele. Ca și în cazul monogon, s-a urmărit de asemenea realizarea unei caracteristici de funcționare de o singură variabilă prin centrarea măsurandului pe axa optică.

Funcțiile de scanare deduse au permis dezvoltarea calculului de proiectare (a sintezei) dispozitivului cu oglindă poligonală prin două metode și pentru diferitele cazuri date de valoarea gradului de acoperire η care reprezintă eficiența utilizării timpului în procesul de scanare. Calculul este completat de Anexele corespunzătoare, cuprinzând studiul pe calculator al aspectelor care necesită aceasta.

Ideea de bază a calculului de proiectare a constituit-o minimizarea (chiar anularea reciprocă) a două din principalele surse de erori care intervin în procesul de scanare (analiza generală a surselor de erori care intervin în procesul de scanare utilizat în măsurători industriale a fost făcută în prealabil în Capitolul 2).

Analiza și sinteza realizată, centrată pe domeniul măsurătorilor dimensionale, a dus la rezultate care pot fi extinse însă asupra întregii game de dispozitive de scanare rotative.

*

Cama optică (Capitolul 3.3) a rezultat din studiul DS rotative ca o concluzie firească pentru eliminarea tuturor surselor erorilor funcționale și pentru simplificarea la maximum a construcției și deci pentru minimizarea costului instalației.

Soluția originală de cap de scanare dezvoltată, posibil a fi obținută printr-un program adecvat, utilizează un sistem refractant de tip simplet sau dublet, spre deosebire de variantele clasice, cu sisteme refractante chiar extrem de complicate, scumpe și proiectate special pentru o anumită aplicație.

Profilul de tip spirală logaritmică, al unicei optice a permis chiar eliminarea totală a sistemului optic refractant în condițiile funcționării capului de scanare conform celor impuse.

*

În Capitolul 4 capul de scanare oscilant, de tip galvanometric, se constituie într-o alternativă viabilă la varianta poligonală. Față de variantele clasice de scanare galvanometrice, soluția dezvoltată s-a urmărit a avea caracteristica liniară cu porțiunea de întoarcere minimă, așadar cu un grad de acoperire η cvasiunitar, spre deosebire de variantele actuale, cu η de maximum 70%.

Din funcția de scanare liniară + sinusoidală aleasă (optimă din punct de vedere mecanic) rezultă funcția de comandă (de curent) necesară, trecând în mod necesar prin etapa calculului momentului activ.

*

Ca o consecință firească a studiului DS unidimensionale (1D), prin înserierea a două DS 1D, rezultând un DS bidimensional (2D) – Capitolul 5 -, numărul aplicațiilor posibile crește corespunzător (vezi și Capitolul 2).

Funcțiile de scanare sunt obținute astfel încât scanarea planului să se realizeze cu o rezoluție dorită, după un anumit “pattern” și cu un grad de acoperire η maxim.

DS tridimensionale (3D) au dus în Capitolul 5.2, la calculul comparatorului optic ca o soluție pentru determinarea celei de a treia dimensiuni: profunzimea.

*

Față de multitudinea de aplicații deja existente ce pot fi abordate (vezi Capitolul 2), în Capitolele 6 și 7 s-a considerat o altă aplicație posibilă, referitoare la studiul

sistemelor optice centrate (axial simetrice).

Scanarea este opțiunea firească pentru testare, deoarece aceasta implică baleierea planului obiect, a planului pupilei de intrare (Capitolul 6: studiul vignetații) sau a axei optice (Capitolul 7: sistemele optice multipupulare).

Câteva concluzii interesante au rezultat din studiul realizat: Astfel, s-a putut vedea că actualul mod de a caracteriza vignetația, prin coeficienți definiți geometric, este îndepărtat de realitatea fizică. Coeficientul de vignetație fotometric propus se observă însă că surprinde mult mai bine esența fenomenului fizic, modelându-l mai precis.

Definirea sa a fost realizată considerându-se interacțiunea fasciculului de lumină incident cu sistemul de diafragme al sistemului optic (diafragme reduse la imaginile lor în fața sistemului optic). Pata de lumină a fost considerată în planul pupilei de intrare, problema fiind abordată atât pentru un obiect situat la distanță finită, cât și pentru obiect situat la distanță infinită de sistemul optic. Concluzia, curba de variație a coeficientului de vignetație, are însă aceeași alură în ambele cazuri.

Sistemele optice multipupulare (noțiune nou-introdusă) utilizează scanarea în parcurgerea axei optice în fața sistemului. Concluzia este că, pentru diferite poziții ale punctului obiect, diferite diafragme vor juca rolul diafragmei de deschidere/de apertură, iar imaginile acestora prin subsistemul optic care le precede, vor juca rolul pupilelor de intrare ale sistemului, pentru diferite tronsoane ale axei optice.

O consecință firească a studiului geometric o constituie aspectele fotometrice deduse: caracterizarea fotometrică a axei optice și deducerea **coeficientului fotometric axial total**.

Concluzia esențială însă este dată de faptul că mărimea utilizată în prezent, **apertura numerică** (pentru puncte obiect situate la distanțe finite de sistemul optic) este doar un caz particular al mărimii care a putut fi definită din studiul realizat: **apertura fotometrică**. Spre deosebire de apertura numerică, aceasta nu rezultă din calculul propriu-zis al anumitor mărimi (vezi rezoluția obiectivelor de microscop, de exemplu), ceea ce ar fi însă, dintr-un anumit punct de vedere, un avantaj, ci din caracterizarea fotometrică generală a axei optice, fără a se cantona într-o anumită aplicație particulară, ceea ce constituie un avantaj din punct de vedere al gradului de generalitate al punerii problemei.

O concluzie colaterală rezultată se referă la calculul fotometric realizat în Anexa 1 ca etapă ajutătoare pentru aspectele din Capitolele 6 și 7. S-a dedus astfel că emitanța M și luminanța L a unei surse finite (unitatea de lungime dintr-o sursă filiformă infinită) sunt legate prin aceeași relație ca și cea cunoscută din literatura de specialitate, dar dedusă până acum doar pentru surse elementare: $M = \pi L$, ceea ce constituie un rezultat surprinzător și cu posibile reverberații ulterioare.

*

Partea a IV-a, experimentală, cuprinzând standul realizat pentru verificarea funcțiilor de scanare pentru DS poligonal și studiul matematic al acestora, a permis concluzionarea corectitudinii aspectelor dezvoltate prin calcul în Capitolul 3.2.

Au putut fi scoase în evidență astfel particularitățile constructive și funcționale ale acestor dispozitive, cele mai importante ca și clasă de aplicații la ora actuală.

Cea de a doua parte experimentală realizată este constituită din **unicama optică**, poate cea mai interesantă soluție rezultată din prezentul studiu. Au rezultat

concluziile necesare, în ceea ce o privește, atât asupra simplității constructive, cât și în ceea ce privește performanțele funcționale atinse.

9.2. Contribuții personale

Partea I: Stadiul actual în dezvoltarea tehnicilor de scanare

- Propunerea unei definiții cuprinzătoare a procesului de scanare;
- Sistematizarea (realizarea clasificării) dispozitivelor de scanare din punctul de vedere al parametrilor funcționali și ai utilizării.

Partea a II-a: Analiza și sinteza dispozitivelor de scanare (DS)

Capitolul 3: Dispozitive de scanare rotitoare

- Determinarea funcțiilor de scanare și a parametrilor caracteristici pentru dispozitive de scanare monogon și poligon;
- Realizarea unor soluții pentru simplificarea și liniarizarea caracteristicii de funcționare a DS mono și poligonale;
- Dezvoltarea soluției de liniarizare a caracteristicii DS monogon cu dispozitiv cu oglinzi-unghi. Realizarea calculului de proiectare al acestui dispozitiv;
- Elaborarea calculului de proiectare (metode, etape, cazuri caracteristice) pentru DS mono și poligonale (vezi și Anexa);
- Cama optică: soluție originală pentru minimizarea erorilor și îmbunătățirea parametrilor dispozitivelor (caracteristică de funcționare liniară, așadar viteză de scanare constantă, grad de acoperire unitar, respectiv simplitate constructivă în ceea ce privește sistemul optic refractant);
- Elaborarea metodei analitice pentru determinarea profilului multicamei optice;
- Realizarea metodei grafo-analitice (cu etape programabile pe calculator) pentru trasarea profilului unei fețe a multicamei optice; prin rotirea acestei fețe se deduce ulterior profilul întregii came;
- Realizarea unicamei optice, cu profilul feței de tip spirală logaritmică, soluție pentru care sistemul optic refractant, prezent în orice sistem de scanare actual, nu mai este necesar. Această variantă originală propusă dezvoltată considerăm că poate reprezenta una din soluțiile de maximă simplitate (și grad de performanță) al dispozitivelor de scanare;

Capitolul 4: Dispozitive de scanare oscilante

- Realizarea unei soluții de cap de scanare galvanometric cu caracteristică liniară de funcționare (pe partea activă a caracteristicii) și grad de acoperire η cvasiunitar;
- Deducerea funcției de comandă a acestor dispozitive pentru îndeplinirea obiectivelor de mai sus.

Capitolul 5: Dispozitive de scanare bi (2D) și tridimensionale (3D)

- Calculul funcțiilor de scanare (sinteza DS bidimensionale) pentru obținerea unei baleieri uniforme a planului scanat;

- “Comparatorul optic”, soluție elaborată pentru determinarea celei de a treia dimensiuni, profunzimea, la scanarea tridimensională (3D).

Partea a III-a: Aplicații ale metodelor și tehnicilor de scanare laser

Capitolul 6: Vignetarea fasciculelor de lumină în sisteme optice (S.O.) centrate

- Sistematizarea, din literatura de specialitate, a modalităților de definire a coeficientului de vignetare. Propunerea unei noi modalități de definire: **coeficientul de vignetare fotometric**;
- Analiza fenomenului de vignetare a fasciculelor de lumină în sisteme optice centrate:
 - stabilirea ipotezei de lucru a reducerii sistemului de diafragme la imaginile acestora, construite în fața sistemului optic;
 - determinarea cercurilor de obscurizare în planul de front;
 - studiul petei de lumină în planul pupilei de intrare;
 - definirea și deducerea expresiilor coeficientului de vignetare geometric și a celui fotometric. Studiu comparativ.

Pentru întreaga discuție, s-a considerat atât cazul obiectului situat la distanță finită de sistemul optic, cât și cazul obiectului situat la infinit.

Capitolul 7: Sisteme optice multipupulare

- Introducerea și definirea noțiunii de **sistem optic multipupilar**;
- Caracterizarea fotometrică a axei sistemelor optice centrate;
- Definirea și deducerea expresiilor **aperturii fotometrice**, mărime nou-introdusă, pentru care **apertura numerică**, mărimea uzitată la ora actuală, constituie doar un caz particular;
- Definirea mărimii: **coeficient fotometric axial total** a unui sistem optic (S.O.) pentru a caracteriza capacitatea S.O. de a recepta lumina incidentă din spațiul obiect. Tratarea cazului general al S.O. multipupulare;
- Izoluxe pe suprafața pupilei de intrare, respectiv a primului dioptru a S.O.;
- Stabilirea identității relației de legătură dintre emitanță și luminanță pentru o sursă finită (unitatea de lungime a unei surse filiforme infinite) și o suprafață elementară (acesta fiind cazul cunoscut din literatura de specialitate).

Partea a IV-a:

- Realizarea și calibrarea standului experimental pentru studiul dispozitivelor de scanare rotative (mono și poligonale);
- Studiul experimental al funcției de scanare pentru dispozitive cu cap poligonal respectiv cu oglindă plană. Validarea aspectelor deduse analitic prin rezultatele obținute experimental;
- Realizarea practică a unicei optice și testarea ei experimentală;

Anexe:

- Sistematizarea etapelor calculului fotometric, cu elaborarea unei scheme logice pentru desfășurarea acestuia;
- Studiul fotometric al unor configurații geometrice de surse de lumină;

- Calculul computerizat al unor funcții caracteristice pentru analiza și sinteza dispozitivelor de scanare.

Anexa 1

ELEMENTE DE FOTOMETRIE

A1.1. Mărimi și unități de măsură energetice/radiometrice și fotometrice/luminoase

a) Mărimi și unități de măsură energetice/radiometrice

Nr.	Denumirea mărimii	Relație de definiție	Unitatea de măsură
1.	Energie radiantă	W_e	$1J=1W \cdot s$
2.	Flux energetic	$\Phi_e = \frac{dW_e}{dt}$ (A1.1)	$1W = 1 \frac{J}{s}$
3.	Eficacitate energetică (P=puterea electrică a sursei de lumină)	$\eta = \frac{\Phi_e \cdot 100}{P}$ (A1.2)	%
4.	Intensitate energetică (a unei surse de radiație, într-o direcție)	$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega}$ (A1.3)	$1 \frac{W}{sr}$
5.	Luminanță energetică (într-o direcție, într-un punct al suprafeței unei surse, a unui receptor sau într-un punct de pe traiectul unui fascicul de radiație)	$L_e = \frac{d^2\Phi_e}{d\Omega dS \cos\theta}$ (A1.4) unde $d\Omega = \frac{dS \cos\theta}{p^2}$ (A1.5) este unghiul solid elementar (Fig.A1.1)	$1 \frac{W}{sr \cdot m^2}$
6.	Iluminare energetică (într-un punct al unei suprafețe) sau radianță	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$ (A1.6)	$1 \frac{W}{m^2}$
7.	Emitanță energetică (într-un punct al unei suprafețe) sau exitanță	$M_e = \frac{d\Phi_e}{dS}$ (A1.7)	$1 \frac{W}{m^2}$

Se mai poate defini densitatea spectrală a oricareia din mărimile definite, în jurul unei lungimi de undă λ (sau a unei frecvențe ν sau a unui număr de undă):

$$X_e = \frac{dX_e}{d\lambda}$$

sau
$$X_{e\nu} = \frac{dX_e}{d\nu} \quad (\text{A1.8})$$

unde cu X_e s-a notat mărimea energetică considerată.

b) Mărimile și unitățile de măsură fotometrice/luminoase se definesc pornind de la **eficacitatea luminoasă spectrală** (a unei radiații monocromatice de lungime de undă λ), definită ca raportul dintre fluxul energetic de lungime λ și un flux de lungime λ_m , atunci când cele două radiații produc senzații identice, λ_m fiind aleasă astfel încât valoarea maximă a acestui raport să fie egală cu 1.

Eficacitatea se determină pentru observatorul fotometric etalon definit de C.I.E. (Commission Internationale d'Eclairage), atât pentru vederea diurnă/fotopică (k_λ), cât și pentru vederea crepusculară/scotopică (k'_λ) - Fig.A1.2.

Rezultă fluxul luminos ca mărimea derivată din fluxul energetic prin evaluarea radiației după acțiunea sa asupra unui receptor selectiv, a cărui sensibilitate spectrală este definită de k_λ . Fluxul luminos are expresia:

$$\Phi = K_m \int k_\lambda \cdot \frac{d\Phi_e}{d\lambda} [lm] \quad (\text{A1.9})$$

unde, în SI, constanta $K_m=692 [lm/W]$ este **echivalentul fotometric al radiației**.

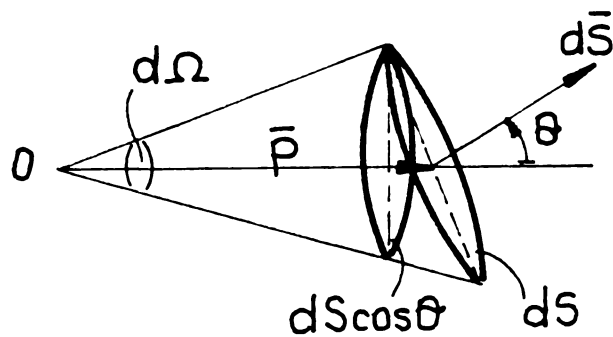
Celelalte mărimi luminoase se definesc utilizând fluxul Φ , analog cu cele energetice.

Unitățile de măsură caracteristice în SI pentru mărimile fotometrice sunt :

$$\langle \Phi \rangle = 1/m = 1cd \cdot sr \text{ (lumen)}$$

$$\langle I \rangle = 1cd \text{ (candela)}$$

$$\langle L \rangle = 1nt = 1 \frac{cd}{m^2} \text{ (nitul)}$$



FigA1.1 Definierea unghiului solid elementar

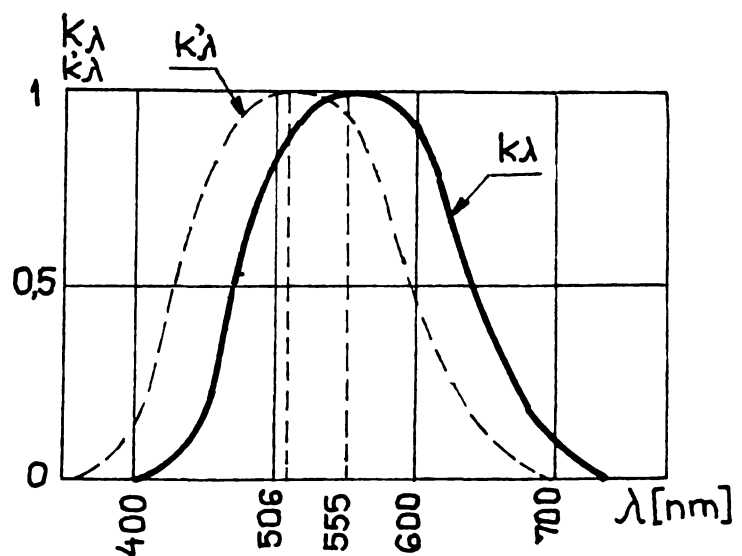


Fig.A1.2 Eficacitatea luminoasă spectrală fotopică (k_λ) și scotopică (k'_λ)

$$\langle M \rangle = 1/x = 1 \frac{lm}{m^2} \text{ (luxul)}$$

Unitatea de măsură din care derivă cele de mai sus este **candela**, unitate de măsură fundamentală în SI, definită ca intensitatea luminoasă într-o direcție dată a unei surse care emite o radiație monocromatică cu $\nu = 540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ ($\lambda = 555.016 \text{ nm}$) și a cărei intensitate energetică în aceeași direcție este $\frac{1 \text{ W}}{683 \text{ sr}}$.

Tot ca mărimi energetice sau fotometrice se pot defini **coeficienții de absorție α , transmisie τ , difuzie δ și reflexie ρ** a unui material:

$$\alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi}; \quad \tau = \frac{\Phi_t}{\Phi}; \quad \delta = \frac{\Phi_d}{\Phi}; \quad \rho = \frac{\Phi_r}{\Phi} \quad (\text{A1.10})$$

unde $\Phi_a, \Phi_t, \Phi_d, \Phi_r$ reprezintă respectiv fluxul absorbit, transmis, difuzat și reflectat din totalul fluxului incident Φ ,

Relația dintre coeficienți este evidentă, din legea de conservare a energiei putându-se scrie:

$$\alpha + \tau + \delta + \rho = 1 \quad (\text{A1.11})$$

A1.2. Legile fotometriei

Din definițiile iluminării și intensității luminoase, legătura dintre aceste două mărimi este:

$$E = I \frac{d\Omega}{dS} \quad (\text{A1.12})$$

de unde, ținând seama de relația (A1.1), rezultă expresia matematică a **legii combinate a fotometriei** (Fig. A1.1):

$$E = \frac{I}{p^2} \cos \theta \quad (\text{A1.13})$$

Ca formulare, din motive istorice dar și aplicative (din practica **luminotehnicii** partea opticii care se ocupă cu aspectele calculului fotometric), rezultă:

1. **Legea inversului pătratului distanței:** Iluminarea unei suprafețe de către lumina provenind de la o sursă punctiformă variază invers proporțional cu pătratul distanței dintre sursa luminoasă și aria suprafeței iluminate.

2. **Legea cosinusului:** Energia luminoasă primită de o suprafață plană variază proporțional cu cosinusul unghiului format de normala la suprafață cu direcția razei incidente.

Justificare intuitivă: considerând sursa punctiformă ca sursă a undelor sferice, energia sursei este uniform distribuită pe suprafața frontului de undă, suprafață ce crește proporțional cu pătratul razei sferei - front de undă. Așadar densitatea de suprafață a energiei este invers proporțională cu pătratul distanței suprafață-sursă. Pe de altă parte, într-un același model al undei sferice, cum direcția de propagare este perpendiculară pe frontul de undă (conform principiului Huygens-Fresnel), un element oarecare de suprafață poate primi energia doar proporțional cu proiecția sa pe un plan perpendicular pe direcția respectivă.

Legea cosinusului mai poate primi și o altă formulare, rescriind definiția luminanței (A1.14), sub forma:

$$L = \frac{dI}{dS \cdot \cos\theta} = \frac{1}{\cos\theta} \cdot \frac{d}{dS} I(\theta) \quad (\text{A1.14})$$

Se definește **suprafața albă difuzantă** ca fiind suprafața ce prezintă aceeași luminanță în toate direcțiile de vizare. Din relația (A1.14), punând condiția $L=ct.$, rezultă:

$$I = I_m \cdot \cos\theta \quad (\text{A1.15})$$

unde $I_m = ct.$ reprezintă intensitatea luminoasă a suprafeței dS după direcția normală. Se poate formula așa:

3. Legea lui Lambert

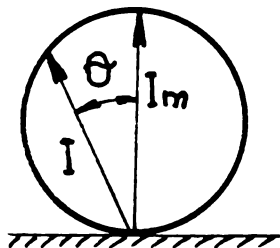


Fig.A1.3. Corpul fotometric al unei suprafețe Lambert (perfect difuzantă)

Suprafața albă difuzantă este acea suprafață pentru care intensitatea luminoasă a unui element de suprafață în orice direcție variază direct proporțional cu cosinusul unghiului format de direcția de emisie și perpendiculara la suprafața emisivă.

Corpul fotometric al unei surse de lumină reprezintă corpul delimitat de înfășurătoarea vectorilor intensitate luminoasă. Din legea lui Lambert, o suprafață este perfect difuzantă dacă și numai dacă fiecare element de suprafață are un corp fotometric sferă tangentă la suprafață (Fig.A1.3).

Observație:

Din relațiile (A1.14) și (A1.15) rezultă legătura dintre luminanța și intensitatea maximă a unei suprafețe albe elementare:

$$dI_m = L \cdot dS \quad (\text{A1.16})$$

Pe aceste considerente se bazează (§A1.3) calculul caracteristicilor fotometrice ale diferitelor configurații geometrice de surse de lumină.

Realizarea unor subansambluri optice cu rol fotometric specific, cum sunt modulatele/chopperle și atenuatoarele optice, se bazează pe o altă lege a fotometriei:

4. Legea lui Talbot

Dacă între sursa luminoasă și suprafața iluminată se interpune un modulator care se rotește cu o frecvență dată astfel încât ochiul să nu perceapă nici o licărire, atunci iluminarea suprafeței este redusă în raportul dat de timpul efectiv de expunere (t_{ef}) și timpul total (T).

Modulatorul M (Fig.A1.4) este realizat ca un disc cu deschidere reglabilă 2α pus în mișcare de rotație cu viteza unghiului ω .

Expunerea luminoasă a suprafeței fotoreceptoare a ochiului este:

$$Q_{ef} = E_{ef} \cdot T = E \int_0^T f(t) \cdot dt \quad (\text{A1.17})$$

unde E_{ef} este iluminarea efectivă, E iluminarea care ar exista în absența modulatorului, iar $f(t)$ funcția de variație a semnalului luminos în timp. Asimilând $f(t)$ cu o funcție serie de impulsuri dreptunghiulare, se definește **coeficientul de atenuare**:

$$k = \frac{E_{ef}}{E} \quad (\text{A1.18})$$

care devine, conform legii lui Talbot:

$$k = \frac{t_{ef}}{T} \cong \frac{\alpha}{\pi} \quad (\text{A1.19})$$

Observație:

Legea lui Talbot este verificată, evident, nu numai pentru ochiul uman, ci pentru orice fotoreceptor cu condiția ca frecvența de iluminare (f_i) să depășească frecvența de pâlpâire a fotoreceptorului (f_p), care pentru ochiul uman are valoarea de 10 Hz. Din exprimarea matematică a acestei condiții:

$$f_i = \frac{\omega}{2(\pi - \alpha)} > f_p \quad (\text{A1.20})$$

rezultă viteza unghiulară minimă ω necesară a modulatorului.

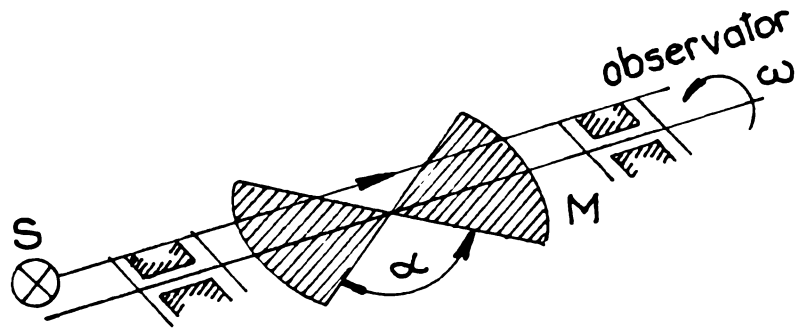


Fig.A1.4 Modulator/Chopper

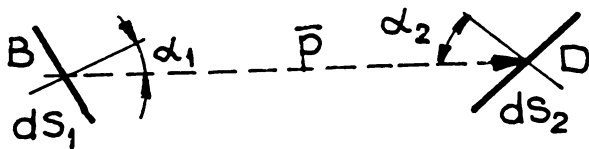
A1.3. Etapele calculului fotometric

Fig.1.5 Poziționarea relativă a suprafețelor emitoare și receptoare

Fie două suprafețe elementare, amplasate conform figurii A1.5. În figura A1.6 este reprezentată schema logică care indică etapele calculului fotometric, schemă care constituie o sistematizare nouă a aspectelor prezentate în literatura de specialitate [B4].

Considerând suprafața dS_1 receptoare, din relațiile (A1.15) și (A1.16), intensitatea luminoasă în direcția suprafeței dS_2 are expresia:

$$dI = L \cdot dS_1 \cdot \cos \alpha_1 \quad (\text{A1.22})$$

Rescriind pentru acest caz legea combinată a fotometriei (A1.11), iluminarea produsă pe dS_2 este:

$$dE = \frac{dI}{p^2} \cdot \cos \alpha_2 \quad (\text{A1.23})$$

unde p reprezintă distanța dintre dS_1 și dS_2 .

Înlocuind (A1.22) în (A1.23), rezultă relația (A1.24) și fluxul luminos $d^2\Phi$ primit de suprafața elementară dS_2 din partea lui dS_1 - rel. (A1.25), putându-se de asemenea scrie fluxul geometric d^2G .

Presupunând că suprafețele elementare considerate dS_1 , respectiv dS_2 , fac parte din două suprafețe cu extensii finite, S_1 , respectiv S_2 , se pot calcula de asemenea următoarele mărimi (Fig.A1.6):

- fluxul luminos emis de dS_1 pe S_2 ;
- iluminarea produsă de punctele suprafeței S_1 în $D \in S_2$;

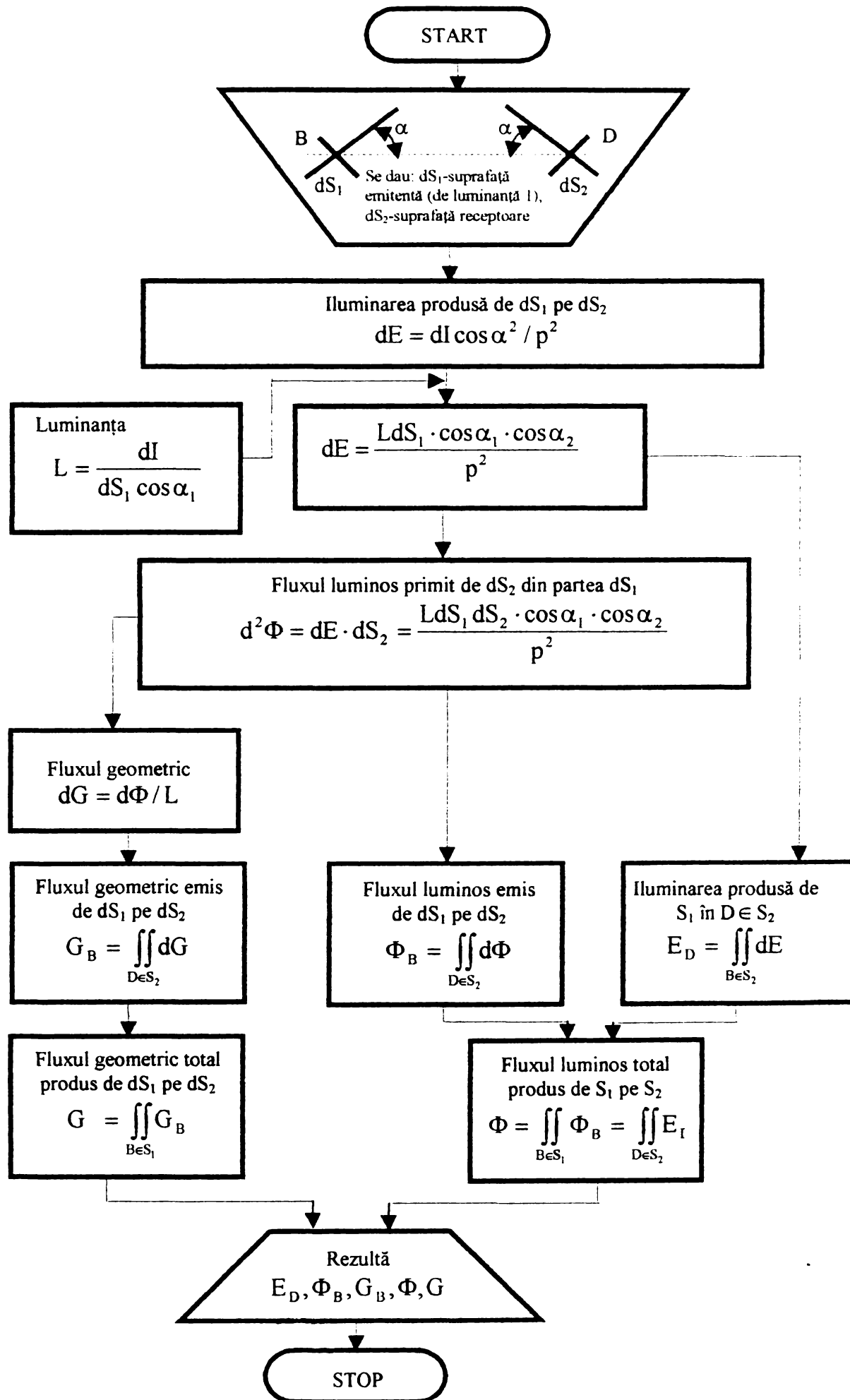


Fig.A1.6 Schema logică a calculului fotometric

- fluxul total produs de punctele suprafeței S_1 pe S_2 .

Domeniile de aplicație ale calculului fotometric sunt:

- **aspectele de luminotehnică:** calculul condițiilor fotometrice (în general al iluminării, ca nivel și uniformitate, dar și calculul luminanței sau a fluxului luminos), în diferite medii ambientale, interioare: muzee, birouri, întreprinderi sau exterioare: șosele, stadioane, gări, aeroporturi, etc.

- **evaluarea performanțelor fotometrice ale echipamentelor optice.**

Calculul analitic, așa cum va fi considerat în continuare, este preferat în general în a doua categorie de aplicații, în timp ce pentru prima, datorită complexității configurațiilor de lumină implicate, dar și a standardizării, se apelează în mod obișnuit la calculul automatizat, care urmărește însă aceleași etape prezentate.

De asemenea, pe lângă partea analitică se realizează obligatoriu verificarea experimentală, cu optimizările corespunzătoare pe configurația propriu-zisă sau pe model.

A1.4. Caracteristicile fotometrice ale unor configurații de surse de lumină

A1.4.1. Sursă punctiformă

Corpul fotometric (§A1.2) este cel care caracterizează din punct de vedere fotometric o sursă punctiformă.

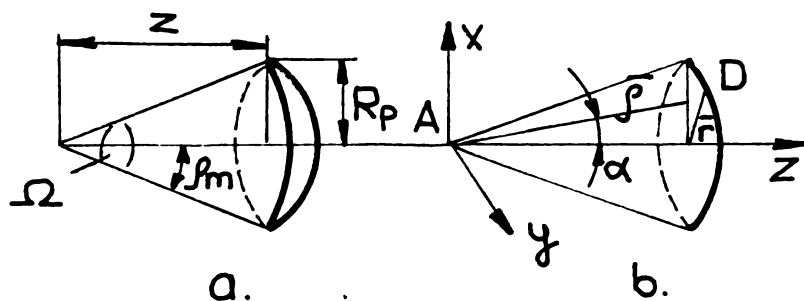


Fig.A1.7 Sursă punctiformă: deducerea fluxului emis printr-o calotă sferică

Odată cunoscută intensitatea luminoasă $I(\theta, \varphi)$ după direcție, utilizând legea combinată a fotometriei (A1.22), se poate determina iluminarea într-un punct oarecare D , pe suprafața dS_2 construită în jurul acestuia.

Fluxul printr-o calotă sferică centrată în sursă

(Fig.A1.7), în ipoteza în care corpul fotometric este sferic (sursa este izotropă, așadar într-un sistem de coordonate polar $I(\theta, \varphi) = ct.$), are, din relația de definiție (A1.1), expresia:

$$\Phi = I \cdot \Omega \quad (A1.32)$$

Efectuând calculele, rezultă:

$$\Phi = 2\pi I(1 - \cos \varphi_m) = 2\pi I \left(1 - \frac{z}{\sqrt{z^2 + R_p^2}} \right) \quad (A1.33)$$

Observație:

La același rezultat se poate ajunge calculând fluxul ce străbate punctele pupilei de rază R_p (Fig.A1.7).

Particularizînd relația lui Φ_B (Fig.A1.5), se obține:

$$\Phi = \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^{R_p} E \cdot dS \quad (A1.34)$$

unde E , iluminarea în D , are expresia dată de legea combinată a fotometriei (A1.23), iar:

$$dS = r \cdot dr \cdot d\theta \quad (\text{A1.35})$$

Caz particular: Fluxul luminos total emis de o sursă punctiformă izotropă printr-o sferă centrată în sursă, rezultă particularizând relația (A1.32):

$$\Phi = 4\pi \cdot I \quad (\text{A1.36})$$

A1.4.2. Sursă suprafață elementară

Fluxul luminos emis prin suprafața unei calote sferice centrate în sursă (Fig.A1.8), simetrică față de A_z , cu unghiul la vârf $2\varphi_m$, are expresia:

$$\Phi = \int_{\theta} \int_{\varphi} I(\theta, \varphi) \cdot d\Omega \quad (\text{A1.37})$$

unde
$$d\Omega = \frac{dS}{R^2} = \sin \varphi \cdot d\varphi \cdot d\theta \quad (\text{A1.38})$$

Considerând suprafața albă difuzantă, rezultă:

$$\Phi = \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{\varphi=0}^{\varphi_m} I_m \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi \cdot d\theta \quad (\text{A1.39})$$

sau, procedînd analog cu cazul anterior și apoi exprimînd pe φ_m (Fig.A1.6):

$$\Phi = \frac{\pi \cdot I_m}{2} (1 - \cos 2\varphi_m) = \pi \cdot I_m \frac{R_p^2}{R_p^2 + z^2} \quad (\text{A1.40})$$

Caz particular: Fluxul emis printr-o semisferă centrată în A este, particularizînd relația (A1.40) pentru $\varphi_m = \pi/2$:

$$\Phi = \pi \cdot I_m \quad (\text{A1.41})$$

Observație:

Din relația (A1.41), diferențiind și împărțind ambii membrii cu dS_1 , respectiv dS_2 (pentru o suprafață elementară emitentă, respectiv receptoare -v. §A1.3), rezultă:

$$\frac{d}{dS_1} \cdot \Phi = \pi \cdot \frac{d(I_m \cos \varphi)}{dS_1 \cdot \cos \varphi} \quad (\text{A1.42})$$

respectiv:

$$\frac{d}{dS_2} \cdot \Phi = \pi \cdot \frac{d(I_m \cos \varphi)}{dS_2 \cos \varphi} \quad (\text{A1.43})$$

de unde se obține, utilizînd relațiile de definiție din §A1.1 și (A1.15), legătura dintre emitanță și luminanță, respectiv dintre iluminare și luminanță în cazul unei suprafețe albe difuzante emitente, respectiv receptoare:

$$M = \pi \cdot L \quad (\text{A1.44})$$

respectiv:

$$E = \pi \cdot L \quad (\text{A1.45})$$

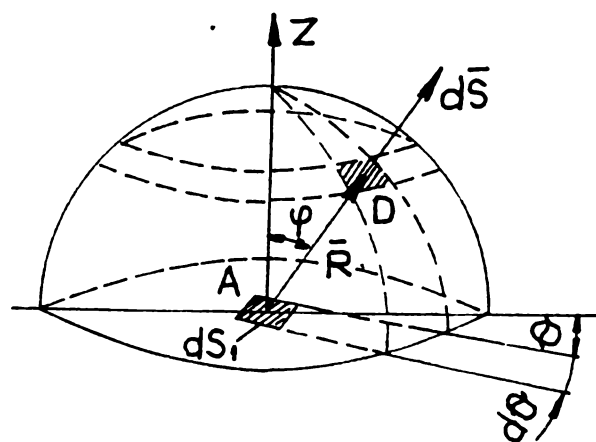


Fig.A1.8 Suprafață Lambert elementară: deducerea fluxului emis printr-o calotă sferică

A1.4.3. Sursă filiformă

Caracteristică (ipoteză de lucru): diametrul δ al sursei este mult mai mic decât toate celelalte dimensiuni și distanțe considerate -Fig.A1.9.

Se poate utiliza așadar următoarea **ipoteză simplificatoare**: în fiecare plan, obiectul emite ca o bandă perpendiculară pe planul considerat.

Calculul fotometric va urma traiectul din schema logică din figura A1.6.

a) **Fluxul luminos prin suprafața laterală a unui cilindru de rază R ce înfășoară sursa.**

Illuminarea elementară produsă de dS_1 pe dS_2 este dată de expresia (Fig.A1.9):

$$dE = \frac{dI}{p^2} \cdot \cos \tau \quad (\text{A1.46})$$

iar intensitatea elementară dI , de relația (A1.15):

$$dI = dI_m \cdot \cos \tau \quad (\text{A1.47})$$

Din considerente geometrice (Fig.A1.10), se poate scrie:

$$\begin{cases} p^2 = l^2 + R^2 \\ \cos \tau = \frac{R}{p} = \frac{\cos \theta}{\sin \varphi} \end{cases} \quad (\text{A1.48})$$

Înlocuind în (A1.46) relațiile (A1.47) și (A1.48), rezultă:

$$dE = \frac{dI_m}{p^4} \cdot R^2 \quad (\text{A1.49})$$

Fluxul produs de dS_1 prin dS_2 este:

$$d^2 \Phi_A = dE \cdot dS_2 \quad (\text{A1.50})$$

Rezultă fluxul produs de dS_1 prin S_2 :

$$d\Phi_A = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{l=-z+z_0}^{l_t-z+z_0} dI_m \cdot \left[\frac{R^2 \cdot R \cdot d\varphi dl}{(l^2 + R^2)^2} \right] \quad (\text{A1.51})$$

unde s-a considerat că:

$$dS_2 = R \cdot d\varphi \cdot dl \quad (\text{A1.52})$$

Efectuând calculele, se obține:

$$d\Phi_A = \pi dI_m \cdot \left[\frac{R(l_t - z + z_0)}{R^2 + (l_t - z + z_0)^2} + \frac{R(z - z_0)}{R^2 + (z - z_0)^2} + \arctg \frac{l_t - z + z_0}{R} + \arctg \frac{z - z_0}{R} \right] \quad (\text{A1.53})$$

b) **Fluxul luminos printr-o pupilă circulară centrată pe axa obiectului.**

Din figura A1.11, luînd în considerare ipoteza de lucru enunțată, rezultă iluminarea produsă de dS_1 pe dS_2 :

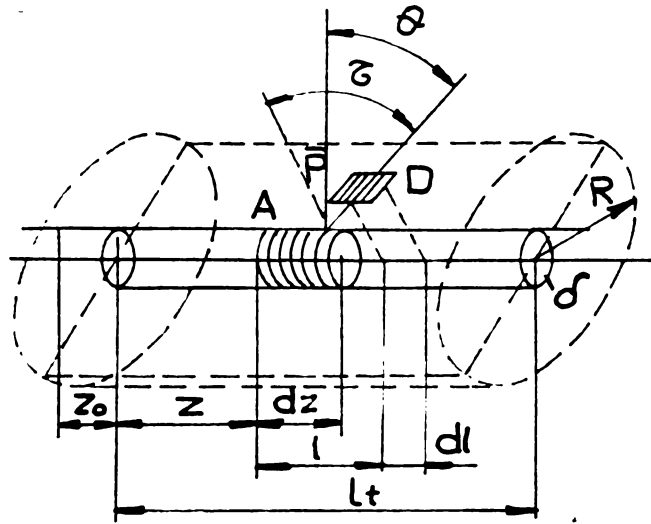


Fig.A1.9 Sursă filiformă: deducerea fluxului emis printr-o suprafață laterală cilindrică înfășurătoare

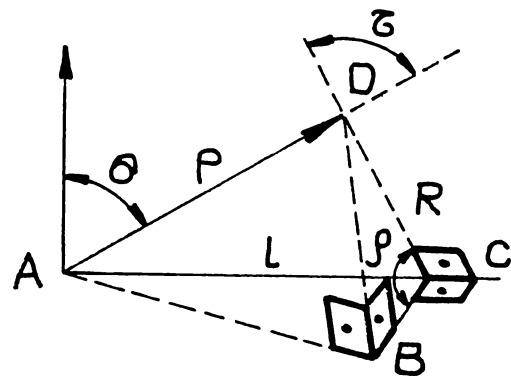


Fig.A1.10 Parametrii geometrici caracteristici pentru deducerea fluxului

$$dE = \frac{dl}{p^2} \cdot \cos \tau_p \quad (\text{A1.54})$$

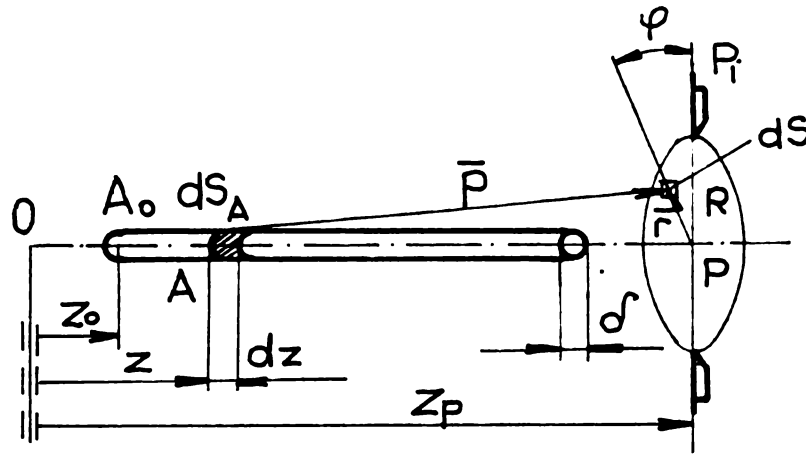


Fig.A1.11 Suprafață filiformă: deducerea fluxului emis printr-o pupilă circulară centrată pe axă

unde, în acest caz:

$$\begin{cases} p^2 = r^2 + (z_p - z)^2 \\ \cos \theta = r / p \\ \cos \tau_p = (z_p - z) / p \end{cases} \quad (\text{A1.55})$$

Având în vedere că $dl = dl_m \cdot \cos \theta$, rezultă:

$$dE = \frac{dl_m (z_p - z)^2}{[R^2 + (z_p - z)^2]^2} \quad (\text{A1.56})$$

În continuare, se poate obține utilizând relația (A1.29), fluxul emis de dS_1 prin S_p :

$$d\Phi_A = \int_{r=0}^R \int_{\varphi=0}^{\pi} dE \cdot dS_p = \pi \cdot dl_m \left[-\frac{R(z_p - z)}{R^2 + (z_p - z)^2} + \operatorname{arctg} \frac{R}{z_p - z} \right] \quad (\text{A1.61})$$

ținându-se seama că: $dS_p = r \cdot dr \cdot d\theta$

$$(\text{A1.62})$$

De asemenea, cu (A1.30), rezultă iluminarea produsă de sursă în $D \in S_p$:

$$E_D = \int_{A \in S_1}^{l_t + z_0} dt = L \frac{\delta}{2} r \left[\frac{1}{r^2 + (z_p - z_0)^2} - \frac{1}{r^2 + (z_p - l_t - z_0)^2} \right] \quad (\text{A1.63})$$

și cu (A1.31), fluxul total produs de sursa S_1 prin suprafața S_p a pupilei rezultă:

$$\Phi_p = \int_{r=0}^R \int_{\varphi=0}^{2\pi} E_D \cdot dS_2 = L \cdot \pi \cdot \delta \left[(z_p - z_0 - l_t) \operatorname{arctg} \frac{R}{z_p - z_0 - l_t} - (z_p - z_0) \operatorname{arctg} \frac{R}{z_p - z_0} \right] \quad (\text{A1.64})$$

unde dS_2 este dată de relația (A1.52).

c) Caz particular

Fluxul emis de unitatea de lungime a unei surse filiforme infinite este:

$$\lim_{\substack{l_t \rightarrow \infty \\ z_p = z_0}} \frac{\Phi + \Phi_p}{l_t} = 2\pi \cdot L \cdot \delta \cdot \arctg \infty + \pi \cdot L \cdot \delta \cdot \arctg 0 = \pi^2 \cdot L \cdot \delta \quad (\text{A1.65})$$

Concluzie:

S-a obținut un rezultat semnificativ, surprinzător în mod plăcut prin felul în care confirmă și generalizează, pentru un corp cu extensie geometrică, rezultatul obținut pentru o suprafață elementară ideală (§A1.4.2), emitanța medie a unității de lungime a unui obiect filiform infinit cu suprafață albă difuzantă rezultând:

$$M = \lim_{l_t \rightarrow \infty} \frac{\Phi + \Phi_p}{\pi \cdot \delta \cdot l_t} = \pi \cdot L \quad (\text{A1.66})$$

expresie identică cu cea clasică, obținută în cazul unei suprafețe elementare sursă Lambert care radiază prin suprafața unei emisfere centrate în ea - relația (A1.44). Rezultatul acesta constituie (v. și Cap.6) un aspect de noutate obținut prin studiul realizat.

Caracteristicile optice ale sortului de sticlă K8 (K108):

Anexa 2

Anexa 2.1

Indici de refractie:

$$n(F: 486,13 \text{ nm}) = 1.521955$$

$$n(e: 546,07 \text{ nm}) = 1.518294$$

$$n(d: 587,56 \text{ nm}) = 1.516373$$

$$n(D: 589,29 \text{ nm}) = 1.5163$$

$$n(C: 656,27 \text{ nm}) = 1.513895$$

Numarul lui Abbe:

$$v(e: 546,07 \text{ nm}) = 63.87$$

$$v(d: 587,56 \text{ nm}) = 64.7$$

$$v(D: 589,29 \text{ nm}) = 64.05$$

$$R=32 \text{ mm}$$

$$e=24 \text{ mm}$$

$$L=100 \text{ mm}$$

$$D=30 \text{ mm}$$

$$d_{\max}=28 \text{ mm}$$

$$h(\theta_1) = -D/2 ; h(\theta_2) = D/2$$

$$n=9 \Rightarrow \alpha=20^\circ$$

Drumuirea paraxiala:

Numar de dioptri: $N=2$

$$d(1) = 10$$

$$r(1) = \infty$$

$$r(2) = -51.4$$

$$n(1) = 1$$

$$n(2) = 1.513895$$

$$n(3) = 1$$

Distanța focală este:

$$f = 100.0204 \text{ mm}$$

$$\theta_{\min} = 24,81^\circ$$

$$\theta_{\max} = 64,81^\circ$$

Drumuirea extraaxiala meridionala:

$$s'_f = 100.0204 \text{ mm}$$

h	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
ds'	-10.1	-8.8	-7.5	-6.4	-5.3	-4.4	-3.5	-2.8	-2.1	-1.5	-1.1	-0.7	-0.4	-0.1	-0.04

h = înălțimea de incidentă

ds' = aberația de deschidere (de sfericitate)

Parametrii optico - geometrici ai lentilei:

-Distanța pe axa optică (in mm):

$$d = 10$$

-Razele dioptrilor (in mm):

$$r1 = \infty$$

$$r2 = -51.4$$

-Indici de refractie (adimensional):

$$n1 = 1$$

$$n = 1.513895$$
$$n_3 = 1$$

REZULTATE:

1. Distanțele focale ale dioptrilor:

$$fb_1 = -(1 \cdot 1E+08) / (1.513895 - 1) =$$
$$= -1.945923E+08 \text{ mm}$$

$$f_1 = (1.513895 \cdot 1E+08) / (1.513895 - 1) =$$
$$= 2.945923E+08 \text{ mm}$$

$$fb_2 = -(1.513895 \cdot -51.4) / (1 - 1.513895) =$$
$$= -151.4204 \text{ mm}$$

$$f_2 = (1 \cdot -51.4) / (1 - 1.513895) =$$
$$= 100.0204 \text{ mm}$$

2. Intervalul optic:

$$\Delta = 10 - (2.945923E+08) + (-151.4204) =$$
$$= -2.945924E+08 \text{ mm}$$

3. Distanțele focale ale lentilei:

$$fb = ((-1.945923E+08) \cdot (-151.4204)) / (-2.945924E+08) =$$
$$= -100.0204 \text{ mm}$$

$$f = -((2.945923E+08) \cdot (100.0204)) / (-2.945924E+08) =$$
$$= 100.0204 \text{ mm}$$

4. Puterea lentilei:

$$f_i' = 1 / ((100.0204) \cdot 0.001) =$$
$$= 9.997961 \text{ dioptrii.}$$

5. Abscisele focarelor lentilelor raportate la focarele dioptrilor:

$$z_{fb} = ((-1.945923E+08) \cdot (2.945923E+08)) / (-2.945924E+08) =$$
$$= 1.945922E+08 \text{ mm}$$

$$z_{f'} = -((-151.4204) \cdot (100.0204)) / (-2.945924E+08) =$$
$$= -5.141048E-05 \text{ mm}$$

6. Abscisele focarelor lentilelor raportate la virfurile dioptrilor:

$$s_{fb} = -(100.0204) \cdot (1 + ((10) \cdot ((1.513895) - 1)) / ((1.513895) \cdot (-51.4))) =$$
$$= -93.41491 \text{ mm}$$

$$s_{f'} = 100.0204 \cdot (1 - ((10) \cdot ((1.513895) - 1)) / ((1.513895) \cdot (1E+08))) =$$
$$= 100.0204 \text{ mm}$$

7. Abscisele planelor principale în raport cu virful dioptrilor:

$$s_H = -93.41491 - (-100.0204) =$$
$$= 6.605476 \text{ mm}$$

$$s_{H'} = 100.0204 - (100.0204) =$$
$$= 0 \text{ mm}$$

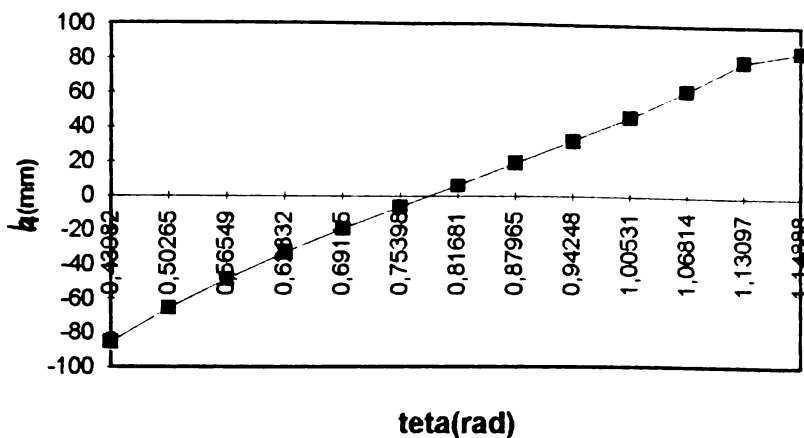
8. Distanța dintre planele principale:

$$i_H = (10) - (6.605476) + (0) =$$
$$= 3.394524 \text{ mm}$$

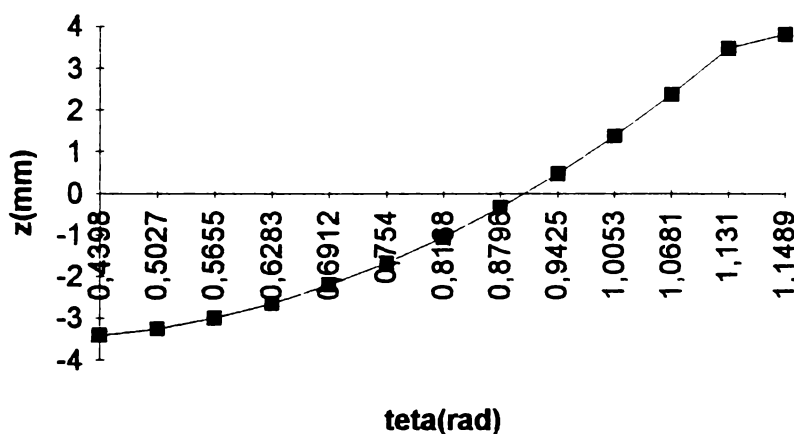
Intrucit succesiunea planelor principale este totdeauna H - H' rezulta:

$i_H > 0$ (la lentile).

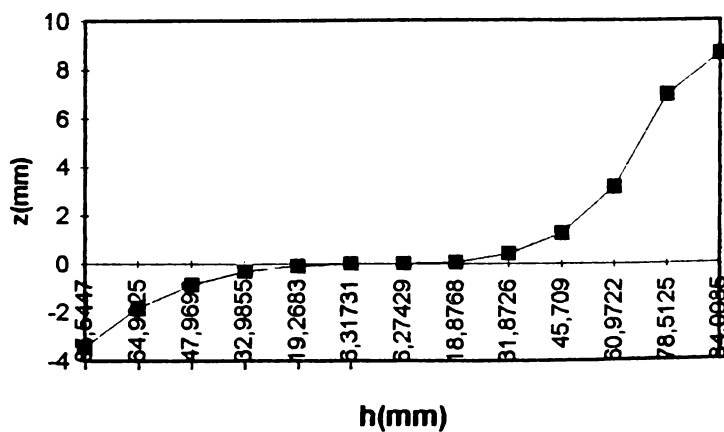
teta	h(teta)
0,439823	-85,54469
0,5026548	-65,52988
0,5654867	-48,4707
0,6283185	-33,35429
0,6911504	-19,49742
0,7539822	-6,396769
0,8168141	6,3574697
0,8796459	19,139807
0,9424778	32,338318
1,0053096	46,40842
1,0681415	61,948614
1,1309734	79,828316
1,1488804	85,526372



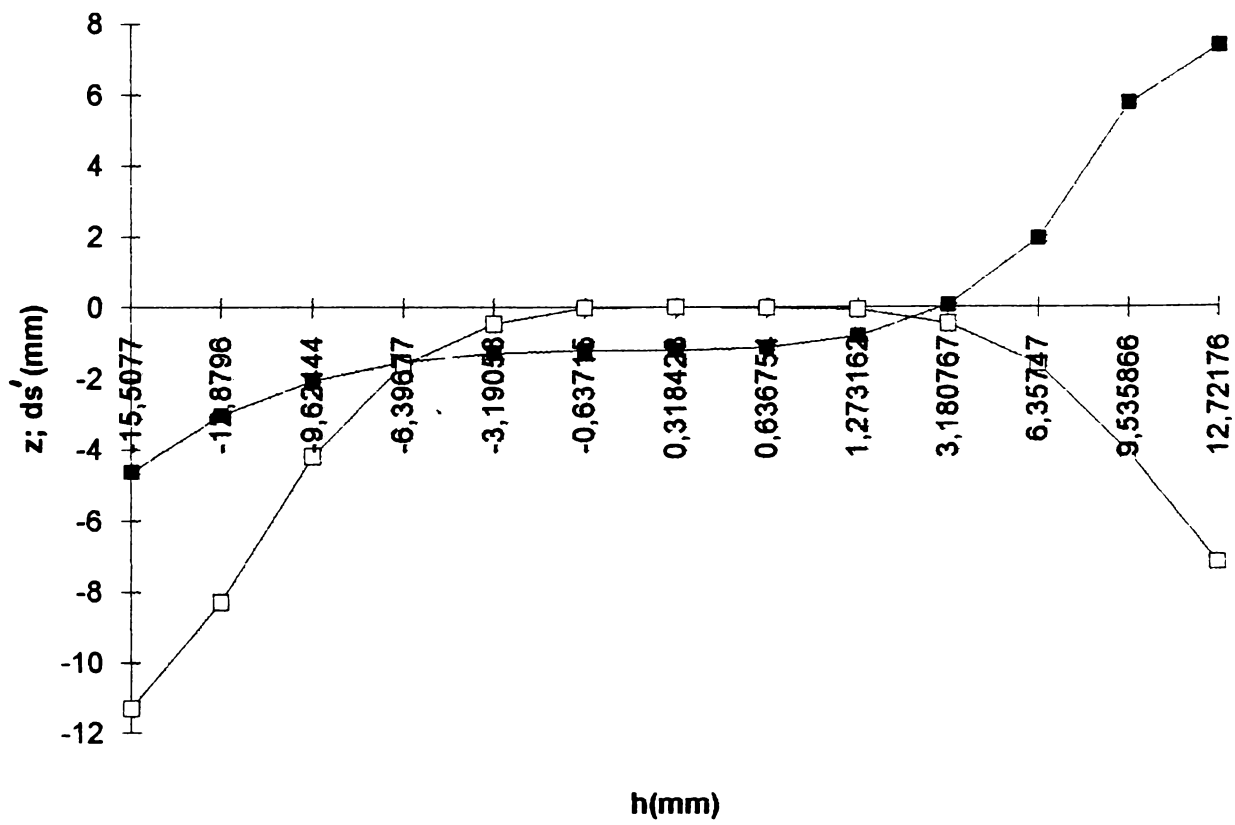
teta	z
0,439823	-3,40577
0,5026548	-3,258569
0,5654867	-3,005475
0,6283185	-2,65395
0,6911504	-2,209049
0,7539822	-1,673737
0,8168141	-1,049088
0,8796459	-0,334379
0,9424778	0,4728911
1,0053096	1,3770877
1,0681415	2,3846037
1,1309734	3,5041426
1,1488804	3,8452415



teta	h	z
0,439823	-85,54469	-3,421028
0,5026548	-64,90245	-1,828364
0,5654867	-47,96978	-0,859577
0,6283185	-32,98552	-0,320729
0,6911504	-19,26834	-0,073374
0,7539822	-6,317307	-0,003251
0,8168141	6,2742923	0,002161
0,8796459	18,876823	0,0759979
0,9424778	31,872642	0,4024634
1,0053096	45,708985	1,268117
1,0681415	60,972164	3,1601071
1,1309734	78,512521	6,9733633
1,1488804	84,098499	8,624411



teta	h	z(h)-z0	ds'	z0
0,7099999	-15,50769	-4,621028	-11,3	0,2729793
0,7225663	-12,87961	-3,028364	-8,3	0,2729793
0,7382743	-9,624441	-2,059577	-4,2	0,2729793
0,7539822	-6,396769	-1,520729	-1,6	0,2729793
0,7696902	-3,190581	-1,273374	-0,45	0,2729793
0,7822566	-0,637147	-1,203251	-0,02	0,2729793
0,786969	0,3184233	-1,197839	0	0,2729793
0,7885398	0,6367542	-1,124002	-0,02	0,2729793
0,7916813	1,2731619	-0,797537	-0,06	0,2729793
0,8011061	3,1807666	0,068117	-0,45	0,2729793
0,8168141	6,3574697	1,9601071	-1,6	0,2729793
0,8325221	9,5358656	5,7733633	-4,1	0,2729793
0,84823	12,721761	7,424411	-7,25	0,2729793



Pentru reducerea aberatiilor se va utiliza un sistem optic simetric, format din doi dubleti.

Calculul dubletului

Sorturi de sticla:

- lentila convergenta: K8(K108)

-lentila divergenta: F2(F102)

Caracteristicile optice ale sortului de sticla K8 (K108):

Indici de refractie:

$$n(F: 486,13 \text{ nm}) = 1.521955$$

$$n(e: 546,07 \text{ nm}) = 1.518294$$

$$n(d: 587,56 \text{ nm}) = 1.516373$$

$$n(D: 589,29 \text{ nm}) = 1.5163$$

$$n(C: 656,27 \text{ nm}) = 1.513895$$

Numarul lui Abbe:

$$Niu(e: 546,07 \text{ nm}) = 63.87$$

$$Niu(d: 587,56 \text{ nm}) = 64.7$$

$$Niu(D: 589,29 \text{ nm}) = 64.05$$

Caracteristicile optice ale sortului de sticla F2 (F102)

Indici de refractie:

$$n(F: 486,13 \text{ nm}) = 1.628436$$

$$n(e: 546,07 \text{ nm}) = 1.620543$$

$$n(d: 587,56 \text{ nm}) = 1.616547$$

$$n(D: 589,29 \text{ nm}) = 1.6164$$

$$n(C: 656,27 \text{ nm}) = 1.611596$$

Numarul lui Abbe:

$$Niu(e: 546,07 \text{ nm}) = 36.35$$

$$Niu(d: 587,56 \text{ nm}) = 36.61$$

$$Niu(D: 589,29 \text{ nm}) = 36.6$$

Drumuirea paraxiala:

Numar de dioptri: $N= 3$

$$d(1) = 9$$

$$d(2) = 2$$

$$r(1) = 77$$

$$r(2) = -48$$

$$r(3) = -120$$

$$n(1) = 1$$

$$n(2) = 1.513895$$

$$n(3) = 1.611596$$

$$n(4) = 1$$

REZULTATE

$$j = 1$$

$$s_1 = \text{INFINIT}$$

$$n_1 / s_1 = 0$$

$$\Delta n_1 = .513895$$

$$\Delta n_1 / r_1 = 6.673961E-03$$

$$n_1 / s_1 + \Delta n_1 / r_1 = 6.673961E-03$$

$$s'_1 = 226.836$$

$$s_2 = 217.836$$

$$s'_1 / s_1 = 0$$

$$j = 2$$

$$s_2 = 217.836$$

$$n_2 / s_2 = 6.949699E-03$$

$$\Delta n_2 = 9.770095E-02$$

$$\Delta n_2 / r_2 = -2.035436E-03$$

$$n_2 / s_2 + \Delta n_2 / r_2 = 4.914263E-03$$

$$s'_2 = 327.9425$$

$$s_3 = 325.9425$$

$$s' 2 / s 2 = 1.505456$$

$$j = 3$$

$$s 3 = 325.9425$$

$$n 3 / s 3 = 4.944418E-03$$

$$\text{delta } n 3 = -.611596$$

$$\text{delta } n 3 / r 3 = 5.096633E-03$$

$$n 3 / s 3 + \text{delta } n 3 / r 3 = 1.004105E-02$$

$$s' 3 = 99.59117$$

s 4 nu se defineste

$$s' 3 / s 3 = .3055483$$

Pt. contin. apasati tasta c.

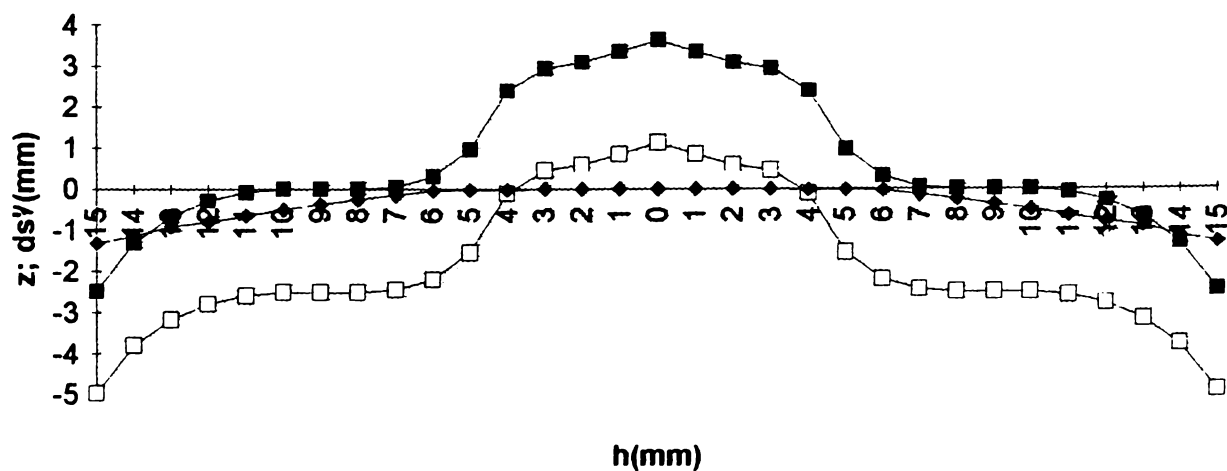
Distanța focală este:

$$f = 104.3422 \text{ mm}$$

Drumuirea extraaxiala meridionala

h(mm)	ds'/
15	-1,32
14	-1,14
13	-0,9
12	-0,8
11	-0,64
10	-0,5
9	-0,36
8	-0,25
7	-0,14
6	-0,05
5	-0,03
4	-0,015
3	-0,008
2	-0,004
1	-0.0012

	teta	h	z	z-z0	ds'1
	0,4330162	15	-2,470004	-4,970004	-1,32
	0,5026548	14	-1,312361	-3,812361	-1,14
	0,5654867	13	-0,665505	-3,165505	-0,9
	0,6283185	12	-0,280185	-2,780185	-0,8
	0,6911504	11	-0,080386	-2,580386	-0,64
	0,7539822	10	-0,006625	-2,506625	-0,5
	0,8168141	9	-0,004153	-2,504153	-0,36
	0,8796459	8	-0,012168	-2,512168	-0,25
	0,9424778	7	0,0499244	-2,450076	-0,14
	1,0053096	6	0,3049296	-2,19507	-0,05
	1,0681415	5	0,9603792	-1,539621	-0,03
	1,1309734	4	2,3981611	-0,101839	-0,015
	1,1466813	3	2,9557337	0,4557337	-0,008
	1,1498229	2	3,0798754	0,5798754	-0,004
	1,1561061	1	3,3420246	0,8420246	-0,0012
	1,1623893	0	3,6238015	1,1238015	-0,0008
	1,1561061	1	3,3420246	0,8420246	-0,0012
	1,1498229	2	3,0798754	0,5798754	-0,004
	1,1466813	3	2,9557337	0,4557337	-0,008
	1,1309734	4	2,3981611	-0,101839	-0,015
	1,0681415	5	0,9603792	-1,539621	-0,03
	1,0053096	6	0,3049296	-2,19507	-0,05
	0,9424778	7	0,0499244	-2,450076	-0,14
	0,8796459	8	-0,012168	-2,512168	-0,25
	0,8168141	9	-0,004153	-2,504153	-0,36
	0,7539822	10	-0,006625	-2,506625	-0,5
	0,6911504	11	-0,080386	-2,580386	-0,64
	0,6283185	12	-0,280185	-2,780185	-0,8
	0,5654867	13	-0,665505	-3,165505	-0,9
	0,5026548	14	-1,312361	-3,812361	-1,14
	0,4330162	15	-2,470004	-4,970004	-1,32



$\nu := 150 \cdot 10^{-5}$ mm/s
 $\tau := 0,88 \cdot 10^{-5}$ s

Ω_i

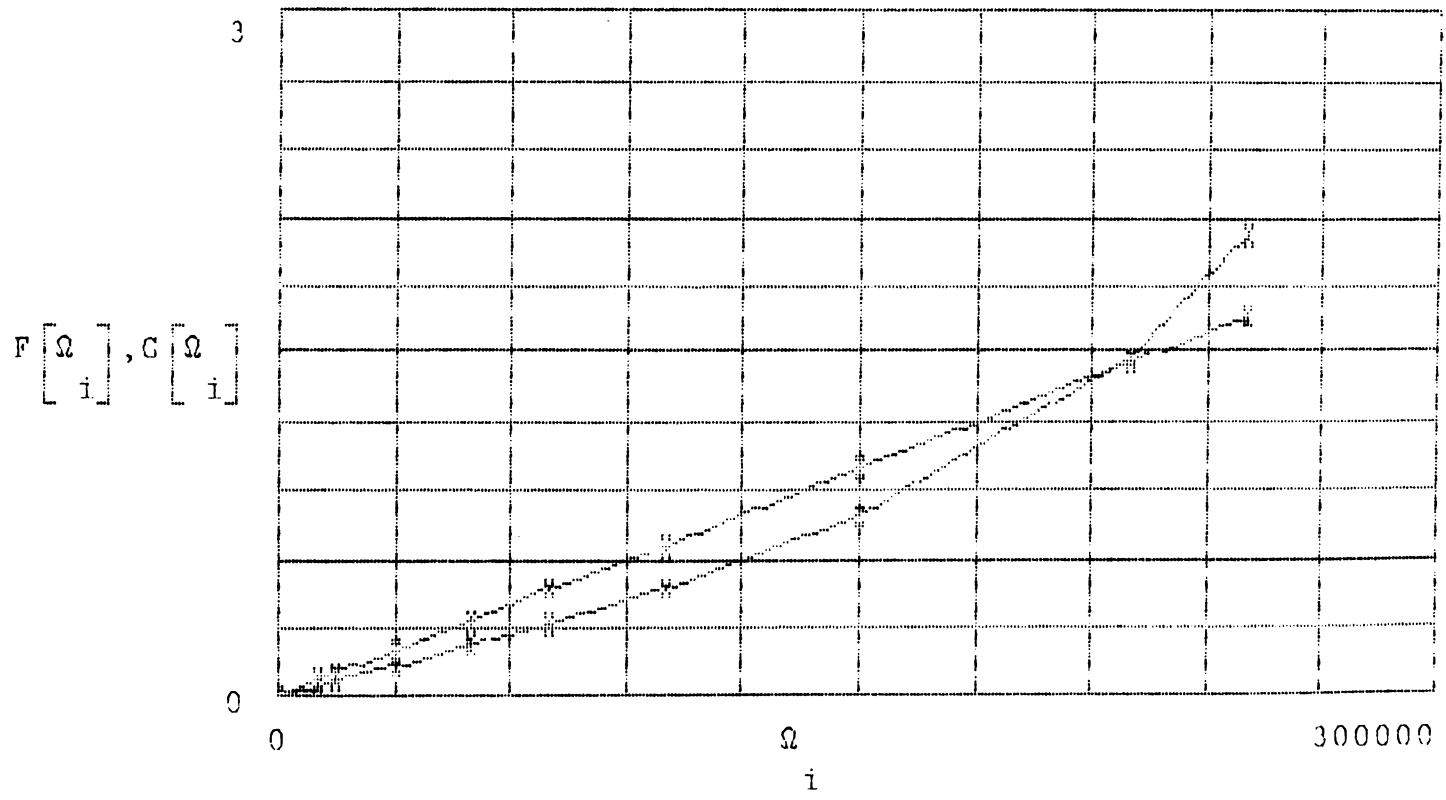
0
10000
15000
30000
50000
70000
100000
150000
220000
250000

$F[\Omega_i]$

0
0,044
0,067
0,134
0,226
0,322
0,476
0,787
1,484
2,02

$G[\Omega_i]$

0
0,067
0,1
0,2
0,333
0,467
0,667
1
1,467
1,667

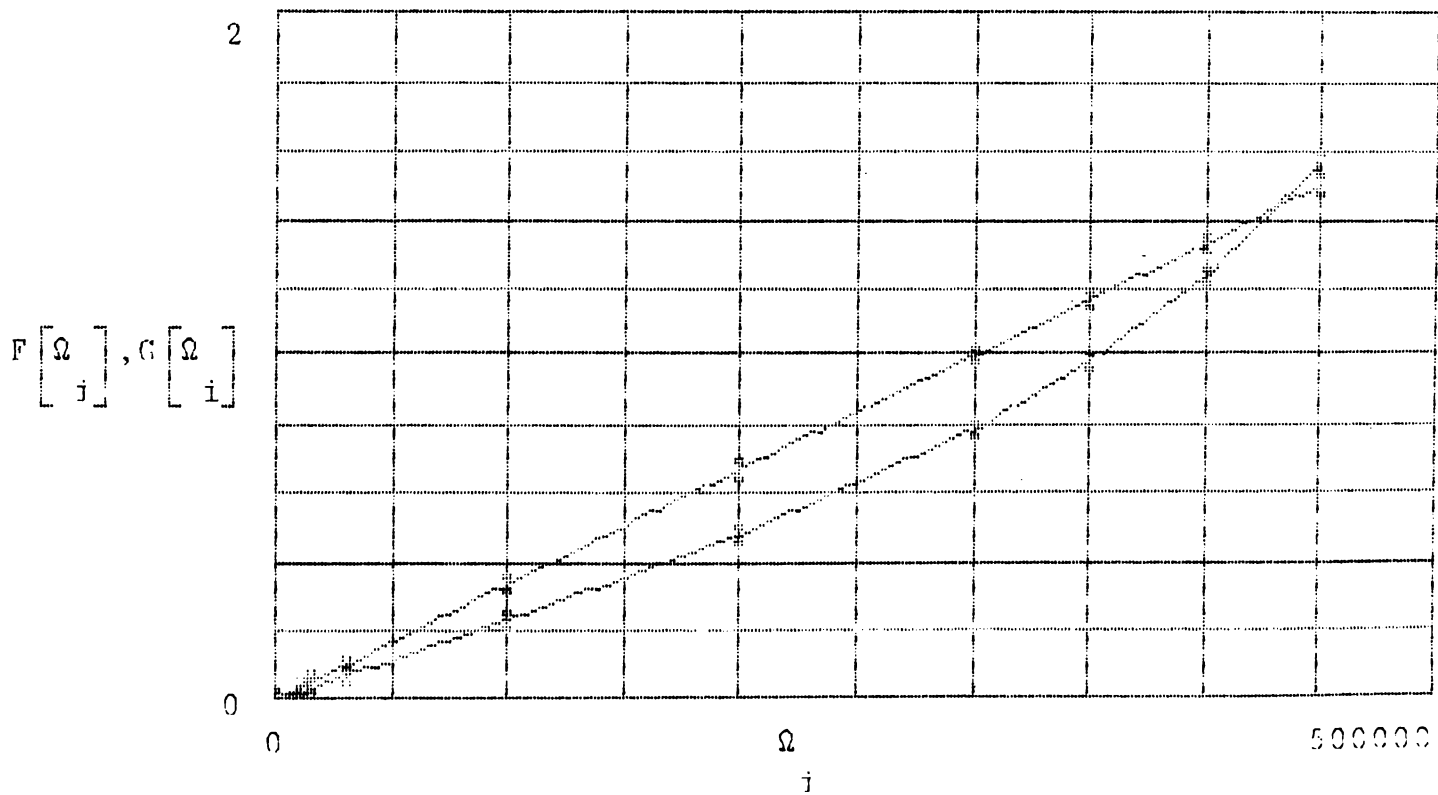


$\rho = 20 \text{ mm}$
 $l = 16 \text{ mm}$
 $\mu = 5$
 $\nu = 3 \cdot 10^{-5} \text{ mm/s}$
 $\tau = 0,88 \cdot 10^{-5}$

Ω_i
0
10000
15000
30000
100000
200000
300000
350000
400000
450000

$F[\Omega_i]$
0
0.022
0.033
0.067
0.226
0.476
0.787
0.985
1.232
1.557

$G[\Omega_i]$
0
0.033
0.05
0.1
0.333
0.667
1
1.167
1.333
1.5



BIBLIOGRAFIE

- [A1] Alexandrescu, C.; Duma, V.-F.: "Galvanometric Laser Scanning Device for Dimensional Measurements", *Bul. Șt. al Univ. Politehnica din Timișoara*, Tom 43 (57), Fasc. 2, Timișoara 1998.
- [A2] Alexandrescu, C.; Duma, V.-F.: "Considerații asupra realizării modulului electronic al dispozitivului de scanare laser de tip galvanometric", IN a XXVII –a Ses. de Comunicări Șt. cu participare internațională a Acad. Tehnice Militare, București 1997.
- [B1] Bass, M. : **Handbook of optics**, vol. I, II, Mc. Graw-Hill, Inc., N.Y. 1995.
- [B2] Băcescu, D.; Bucșan, C. : "Traductor optoelectronic pentru determinarea direcției", IN *Rev. Rom. de Mecanică Fină și Optică* 5 și 6, Nr.8, București 1995/1996.
- [B3] Brixner, A.; Klein, M.M. : "Optimization to create a four –element laser scan lens from a five element design", *Opt. Eng.* 31 (6), 1257-1258, 1992.
- [B4] Bianu, V. V. : **Optica geometrică**, Ed. Tehnică, București 1962.
- [B5] Bianchi, C. : **Lumino tehnica**, Ed. Tehnică, vol. I, II, București 1990.
- [B6] Buracu, M. N. : **Mijloace de luptă cu infraroșii**, Ed. Militară, București 1965.
- [C1] Cojoc, D.; Curatu, E., Taloi, E. : "Observații privind baleierea fascicolului laser cu oglindă poligonală; aplicații la controlul dimensional al pieselor, fără contact", IN *Rev. Rom. de Mecanică Fină și Optică* 2, Nr. 4, București 1993, pg. 435÷436
- [C2] Chang, C.Y. ș.a. : "First SIR-C ScanBAR results", IN *Geoscience and Remote Sensing*, Sept. 1996, No.5 (Vol. 34), pg. 1278÷1281.
- [C3] Crawford, F.S. : **Unde – Cursul de fizică Berkely**, vol. III, E.D.P., București 1983.
- [C4] Constantinescu, P. : **Bazele construcției și proiectării aparaturii artileristice**, vol. I, (Bazele proiectării aparaturii optice afocale), Ed. Academiei Militare, București 1970.
- [D1] Duma, V.-F., Nicoară, I. : "Considerații privind calculul fluxului de lumină incident pe sisteme optice centrate", IN *Simpoz. M.T.M. (VI)*, vol. 4, Timișoara 1992.
- [D2] Duma, V.-F., Nicoară, I. : "Some Optical Characteristics of the Axis of the Centered Optical Systems", *Bul. Șt. și Tehnic al U.P.Timișoara*, Tom 39(53), Mate.-Fiz, Timișoara 1994.
- [D3] Duma, V.-F., Nicoară, I. : "Some Photometric Aspects Regarding Axial Objects Placed in Front of Centered Optical System", *Bul. Șt. și Tehnic al U.P.Timișoara*, Tom 39(53), Mate.-Fiz, Timișoara 1994.

- [D4] Duma, V.-F., Nicoară, I. : “Considerații asupra modalităților de definire a coeficientului de vignetaire”, IN Analele Univ. din Oradea, Seria Mecanică, 1994.
- [D5] Duma, V.-F. : “A Study of the Vignetting for Some Optical Systems”, IN Rev. Română de MF&Optică (Supliment COMEFIN 4, vol. II), București 1994.
- [D6] Duma, V.-F.; Nicoară, I. : “The Axial Photometric Coefficient of an Optical System”, IN Rev. Română de MF&Optică (Supliment COMEFIN 4, vol. II), București 1994.
- [D7] Duma, V.-F.; Nicoară, I. : “O analiză cantitativă a limitării fasciculelor de lumină incidente în sisteme optice centrate”, IN Analele Univ. “Aurel Vlaicu”, Seria Mecanică, Arad 1996.
- [D8] Duma, V.-F.; Nicoară, I. : “Coeficientul de vignetaire geometric al sistemelor optice centrate”, IN Analele Univ. “Aurel Vlaicu”, Seria Mecanică, Arad 1996.
- [D9] Duma, V.-F.; Perju, D. : “Laser Scanning Devices: a Mathematical Analysis”, IN 9 Kongreßmesse für Industrielle Meßtechnik, Mess Comp '95, Wiesbaden 1995.
- [D10] Duma, V.-F.; Perju, D. : “Analiza dispozitivelor de scanare cu elemente în mișcare de rotație”, IN Ses. de Comunicări Șt. ale Univ. “Aurel Vlaicu”, Arad 1997, pg. 87÷96.
- [D11] Duma, V.-F. : “Calculul de proiectare al dispozitivelor de scanare cu oglindă poligonală”, IN Ses. de Comunicări Șt. ale Univ. “Aurel Vlaicu”, Arad 1997, pg. 97÷106.
- [D12] Duma, V.-F.; Alexandrescu, C. : “Dispozitiv de scanare laser de tip galvanometric”, IN a XXVII –a Ses. de Comunicări Șt. cu participare internațională a Acad. Tehnice Militare, București 1997, p.67-76.
- [D13] Duma, V.-F.; Perju, D. : “The Designing Calculus of the Rotating Mirror Scanning Devices”, IN Simpoz. MTM VIII, Timișoara 2000.
- [D14] Duma, V.-F. : “Sisteme de scanare uni și bidimensionale aplicate în robotică”, IN Analele Univ. din Oradea, 2000.
- [D15] Drude, P. : **Précis d'optique**, vol. I, Imprimerie Gauthier-Villas, Paris 1911.
- [D16] Dodoc, P. : **Teoria și construcția aparatelor optice**, Ed. Tehnică, vol I, II, București 1989.
- [F1] Feynman, R.P. : **Fizica modernă**, Ed. Tehnică, București 1969.
- [G1] Grosu, F. : **Echipamente de cinematografie și fotografie**, Lito U.P.T., vol I, 1991, vol. II, 1994, Timișoara.
- [H1] Hook, S.J.; Okada, K. : “Inflight Wavelength Correction of Thermal Infrared Multispectral Scanner (TIMS) Data Acquired from the ER-2”, IN Geoscience and Remote Sensing, vol. 34, No. 1, January 1996, pg. 179÷188.
- [H2] Huțanu, Gh. : **De la optica clasică la optica modernă**, Ed. Șt. și Enciclopedică, București 1984.
- [I1] Iova, I. : **Elemente de optică aplicată**, Ed. Șt. și Enciclopedică, București 1977.
- [I2] Iliescu, C-tin și. colab. : **Măsurări electrice și electronice**, E.D.P., București 1983.
- [K1] Kinslake, R. : **Lens Design Fundamentals**, Academic Press, N.Y., San Francisco, London 1978.

- [L1] Luca, E. ș.a. : **Fizica generală**, E.D.P., București 1981.
- [M1] Mateaș, M.; Duma, V.-F. : “Robotics Application of a 2D Scanning Device”, IN The Romanian Review of Precision Mechanics&Optics, Supplement 2/1998 (COMEFIM5), pg. 411÷416.
- [M2] Mihalca, I. : **Optica**, Lito U.P.T., vol. I, Timișoara 1981.
- [M3] Moasil, G.C.; Curatu, E. : **Optică. Teorie și aplicații**, Ed. Tehnică, București 1986.
- [M4] Murthy, E.K. : “Elimination of the thick meniscus element in high-resolution scanning lenses”, Opt. Eng. 31 (1), 95÷97, 1992.
- [N1] Neluțescu, C. Ș.a. : “Sistem de supraveghere și conducere a procesului de laminare la rece pentru un laminor de tip cuarțo-reversibil”, IN Rev. Română de Automatică, nr. 3/1995, pg. 71÷75.
- [N2] Nicoară, I.; Duma, V.-F. : “Aspecte privind determinarea pupilelor și lucarnelor de intrare într-un sistem optic centrat”, IN Simpoz. M.T.M. (VI), vol. 4, Timișoara 1992.
- [N3] Nicoară, I.; Duma, V.-F. : “O metodă de determinare a pupilelor și lucarnelor de intrare a unui sistem optic centrat”, IN Cercetări în Optoelectronică (CNOE), București 1994.
- [N4] Nicoară, I. : **Calculul și construcția aparatelor optice**, Lito. U.P.T., Timișoara, vol I, II, 1987.
- [N5] Nicoară, I.; Duma, V.-F. ș.a. : **Aparate optice. Tehnici de laborator**, Ed. Mirton, Timișoara 1996.
- [N6] Nicoară, I.; Gruescu, C.; Ațițoaiei, N.; Duma, V.-F. : **Aparate optice**, vol. I, Ed. Orizonturi universitare, Timișoara 2000.
- [O1] O’ Shea, Donald C. : **Elements of Modern Optical Design**, John Wiley&Sons, N.Y. 1985.
- [P1] Perju, D. : **Aparate și sisteme de măsurare** – notițe de curs, Universitatea Politehnica din Timișoara, 2000.
- [P2] Perju, D.; Duma, V.-F. : “Laser Dimensional Measurements: The Rotating Mirror Device”, IN Simpoz. M.T.M. VII, Reșița 1996.
- [P3] Perju, D.; Duma, V.-F. : “Laser Scanning Devices: The Measurement Techniques”, IN M.T.M. VIII, Timișoara 2000.
- [P4] Pommersheim, A. : **Optică tehnică**, vol. I, II, Lito. U.P.T., Timișoara 1989.
- [P5] Pommersheim, A.; Gruescu, C., Zsivanov D., Duma, V.-F. : **Optică tehnică și aparate optice**, Îndr. de laborator, Lito. U.P.T., Timișoara 1982.
- [P6] Pop, E.; Chivu, M. : “Măsurări electrice și magnetice”, vol. I, Lito U.P.T., Timișoara 1971.
- [P7] Popescu, I.I.; Toader, E.I. : **Optica**, Ed. Șt. și Enciclopedică, București 1989.
- [P8] Popescu, I.M. : **Teoria electromagnetică macroscopică a luminii**, Ed. Șt. și Enciclopedică, București 1986.
- [P9] Popescu, I.M. : **Fizica**, voi. I, E.D.P., București 1982.
- [P10] Prat, R. : **L’optique**, Ed. Du Seuil, Paris 1962.
- [P11] Preston, K. : **Coherent Optical Computers**, McGraw-Hill Book Company, N.Y. 1972.
- [R1] Richter, B. : “Laser Scan Devices for Industrial Application”, IN WIRE 42 (1992) 6, Meisenbach GmbH, D8600 Bamberg, Printed in Germany.

- [S1] Santek, D.; Duretek, I. : “Rapid Prototyping”, IN Konstruktionspraxis Nr.6, Juni 1996, pg. 50÷61.
- [S2] Savelyev, I.V. : “**Physics**”, vol. I, II, MIR, Moscow 1989.
- [S3] Sears, F.W. : **Fizica**, E.D.P., București 1983.
- [S4] Sivuhin, D.V. : **Obskii Curs Fiziki, Optica**, Ed. Nauka, Moskva 1985.
- [S5] Sterian, P.; Stan, M. : **Fizica**, E.D.P., București 1985.
- [S6] Sturzu, A.; Popan, Gh. : “Evaluarea componentelor erorii de măsurare datorate sursei laser la măsurarea prin scanare”, IN Rev. Rom. de Mecanică Fină și Optică 5 și 6, Nr.7, București 1995/1996, pg. 709÷712.
- [T1] Taton, R. : **Bases de l’optique et principes des instruments**, Ed. Eyrolles, Paris 1964.
- [T2] Tippett, J.T. : **Optical and Electro-Optical Information Processing**, MIT Press, Cambridge 1968.
- [T3] Tsufura, L. : “Barcode Scanning. Ongoing Evolution&Development”, IN Lasers&Optronics, July 1995, pg. 25÷27.
- [*1] *** : “Confocal Laser Scanning Microscope FLUOVIEW”, IN Mikroskopie Nr. 12, Oct. 1997.
- [*2] *** : “Computer Aided Light Microscopy”, Olympus and Soft Imaging System GmbH, Prospect 1997.
- [*3] *** : “PQ 6000 Spiral Imaging”, Picker Prospect 1997.
- [*4] *** : “Toshiba Prospects, 1997.
- [*5] *** : “Precision Optics”, Splinder&Hoyer, 1989.
- [*6] *** : “Photonics Spectra Collection”, 1995-2000.
- [*7] *** : **Aplicații ale aparatelor optice**, Inst. Central de Documentare tehnică, București 1970 (Culegere de texte).