

ing. GABRIELA NEGRU-STRĂUȚI

TEZA DE DOCTORAT

CORELAREA PARAMETRILOR DE CALITATE A IMAGINII
CU TEHNOLOGIA DE EXECUȚIE ȘI MONTAJ A
SISTEMELOR OPTOMECANICE

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:
PROF.DR.ING. IOAN NICOARĂ

BIBLIOTECA	
Nr. volum	1-199
Dulap	3629 Lit. 1

2004

CUPRINS

Introducere.....	5
1. Stadiul actual privind influența erorilor de execuție și montaj asupra calității imaginii. Scopul și obiectivele tezei	7
1.1. Generalități	8
1.2. Erori de execuție	10
1.3. Erori de montaj.....	22
1.4. Studiul analitic al erorilor de montaj.....	25
1.5. Toleranțele parametrilor de calitate a imaginii și corelarea lor cu toleranțele de execuție și montaj a lentilelor	28
1.6. Concluzii	30
2. Parametri de apreciere a calității imaginii	34
2.1. Generalități	35
2.2. Aberații optice	35
2.2.1. Generalități	35
2.2.2. Aberația de undă	36
2.2.3. Efectul de difracție al diaframelor.....	37
2.2.4. Aberații geometrice.....	39
2.2.4.1. Aberația sferică.....	39
2.2.4.2. Coma.....	40
2.2.4.3. Astigmatismul și curbura de câmp	42
2.2.4.4. Distorsiunea.....	44
2.2.5. Aberații cromatice.....	45
2.2.6. Criterii ondulatorii de evaluare a calității imaginii.....	48
2.2.7. Diagrama spot	49
2.3. Metode de analiză a calității imaginii.....	50
2.3.1. Trasarea razelor în domeniul paraxial.....	50
2.3.2. Trasarea razelor în domeniul extraaxial.....	53
2.3.3. Metode de analiză bazate pe optica Fourier	58
2.4. Concluzii	63
3. Analiza influenței erorilor de execuție și montaj asupra calității imaginii. Modelare și simulare	66
3.1. Analiza unui dublet acromat limitat la difracție.....	67
3.1.1. Caracteristicile sistemului ideal (fără erori de execuție și montaj)	67
3.1.2. Influența erorilor de execuție.....	71
3.1.3. Influența erorilor de montaj	79
3.1.4. Analiza influenței cumulate a erorilor de execuție și montaj	84
3.2. Analiza unui subansamblu optic complex.....	94
3.2.1. Caracteristicile sistemului ideal (fără erori de execuție și montaj)	94
3.2.2. Influența erorilor de execuție.....	97
3.2.3. Influența erorilor de montaj	103
3.2.4. Analiza influenței cumulate a erorilor de execuție și montaj	112

3.3. Concluzii	122
4. Determinări experimentale.....	126
4.1. Considerații generale	127
4.2. Descrierea standului	127
4.3. Rezultate experimentale.....	131
4.4. Concluzii	142
5. Concluzii finale și contribuții personale	145
BIBLIOGRAFIE.....	152

INTRODUCERE

În contextul actual al unei pieți dominate de concurență, calitatea produselor și relația preț-calitate își afirmă primatul în evoluția oricărui producător.

Oferta de produse optice a cunoscut în trecutul apropiat, începând din ultimele două decenii ale secolului al XX-lea, o extindere fără precedent, având în vedere posibilitățile deschise de ingineria optică modernă și implementarea unor tehnologii noi.

Creșterea calității produselor care conțin subansambluri optice s-a bazat în primul rând pe evoluția ingineriei optice, respectiv a metodelor de analiză și sinteză a sistemelor optice.

Utilizarea sistemelor automate de calcul și a metodelor numerice a permis depășirea barierei volumului mare și repetitiv de calcul optic - impediment care secole de-a rândul a întârziat optica aplicată în raport cu cea fundamentală – și a impulsionat perfecționarea aparatelor tradiționale și dezvoltarea aplicațiilor în domeniile infraroșu și ultraviolet.

În evoluția ingineriei optice – domeniu în care acumulările cantitative semnificative sunt relativ recente – se manifestă un decalaj între ramurile dedicate analizei, respectiv sintezei, la convergența cărora se găsesc soluțiile de sisteme optice performante. Analiza sistemelor optice a atins un grad de rafinament care permite aprecierea calității imaginii în domeniul nanometric, prin parametri care se măsoară în fracțiuni de lungime de undă. Determinarea experimentală la această delicată scară este încă dificilă, problematică și foarte costisitoare. Rămâne foarte accesibilă, rapidă, economică și de încredere modelarea și simularea numerică a sistemelor optice, asupra cărora se poate efectua, cu mare acuratețe o temeinică analiză.

Cu un pas în urmă se află domeniul sintezei sistemelor optice, domeniu care a NU emis până la nivel de standardizare metode de proiectare definitive. În acest context analiza dobândește o importanță suplimentară, fiind instrumentul care semnalează iterativ, calitativ și numeric, elementele perfectibile ale sistemelor rezultate prin sinteza brută, bazată încă pe dioptica de ordinul III.

Prezenta teză se înscrie în aria largă a tematicii creșterii calității în domeniul sistemelor optice și se situează la confluența demersurilor de sinteză și analiză.

Subiectul tezei are la bază observația că tot calculul optic de sinteză și analiză se desfășoară în mod tradițional pentru sisteme optice geometric ideale atât în privința formei și dimensiunilor componentelor, cât și a poziției relative a acestora. Este evident faptul că, în realitate, orice piesă, indiferent de procesul de uzinare, are dimensiuni și forme efective, diferite de cele nominale, ideale. De asemenea, poziția relativă a elementelor și

subansamblurilor optice în tubul mecanic, va fi caracterizată de abateri de la centrarea ideală de-a lungul axei optice și de la perpendicularitatea planelor principale pe această axă.

În condițiile în care modelarea, simularea și analiza automată permit determinarea influenței acestor abateri asupra caracteristicilor de referință și asupra parametrilor de calitate a imaginii formate de sistemele optice, se propune un studiu care să evidențieze nivelul și ponderea cu care erorile de execuție și montaj afectează calitatea imaginii.

Având în vedere volumul redus și abordările incomplete din literatura de specialitate se consideră util un studiu sistematic al influenței acestor erori. Se urmărește formularea unor recomandări concrete privind toleranțele elementelor geometrice dimensionale, de formă și poziție a componentelor optice, astfel încât calitatea imaginii să se încadreze în categoria estimată pentru sistemul ideal, rezultat prin sinteză.

În prezent, proiectanții de aparate optice apelează la indicații cu caracter general, care recomandă alegerea abaterilor admise în intervale relativ largi, în interiorul cărora decizia este empirică. O astfel de recomandare poate avea un caracter excesiv, impunând costuri ridicate prin prescrierea unor toleranțe strânse, sau, dimpotrivă, poate fi insuficientă, compromițând calitatea produsului. Se consideră justificată o abordare matematică, tehnică și tehnologică, în același timp având în atenție factorul economic.

Pe parcursul lucrării, pentru toate subansamblurile analizate cu excepția lentilei singulare, se urmărește menținerea sistemului optic la cel mai înalt nivel de calitate, acela caracterizat prin „limitat la difracție”.

Teza, care își propune să contribuie la rafinarea procesului complex de asigurare a calității sistemelor optice, este rezultatul unui studiu extins pe mai mulți ani, de-a lungul cărora autoarea a beneficiat de îndrumarea atentă, binevoitoare și competentă a conducătorului științific, dl prof. dr. ing. Ioan Nicoară. Autoarea își exprimă gratitudinea pentru ideile științifice și suportul moral pe care le-a primit permanent din partea conducătorului științific.

Totodată mulțumirile autoarei se îndreaptă către dna conf. dr. ing. Corina Gruescu, a cărei generozitate și prietenie le-a avut mereu alături.

**1. STADIUL ACTUAL PRIVIND INFLUENȚA ERORILOR DE
EXECUȚIE ȘI MONTAJ ASUPRA CALITĂȚII IMAGINII.
SCOPUL ȘI OBIECTIVELE TEZEI**

1.1. GENERALITĂȚI

Calculul optic tradițional se bazează pe ipoteza unei geometrii ideale a sistemelor optice, astfel încât atât analiza cât și sinteza presupune că dioptrii au forme nominale sferice, plane sau asferice și sunt perfect centrați pe axa optică.

Sistemele optice reale, însă, sunt afectate de erori care influențează negativ calitatea imaginii. Motivul pentru care aceste erori sunt neglijate nu rezidă în faptul că sunt lipsite de importanță, ci este acela că erorile sunt numeroase, variate, greu de cuantificat și apar aleator.

Erorile care pot afecta sistemele optice se pot clasifica în două mari categorii:

- erori de execuție
- erori de montaj.

Erorile de execuție sunt determinate de parametrii caracteristici prelucrărilor mecanice: vibrații, uzarea mașinii sau sculei, dereglări în sistemul mașină-sculă-piesă etc. Aceste erori de prelucrare pot avea ca efect valori diferite ale razelor în raport cu cele nominale, abateri de la formele nominale sferică, plană sau asferică (globale sau nominale). În aceeași categorie se includ erorile introduse de abaterea de la poziția relativă nominală a suprafețelor lentilelor lipite într-un subansamblu. În acest sens pot apărea descentrări ale dioptrilor cauzate de înclinări unghiulare sau deplasări liniare ale vârfului suprafeței în raport cu oricare dintre cele trei axe de referință.

Este evident că valori nominale ale parametrilor geometrici și poziții relative ideale ale dioptrilor nu pot fi obținute. Se pune problema determinării toleranțelor geometrice, de formă și de poziție astfel încât imaginea formată de sistemul optic să se încadreze într-o categorie de calitate dată. Această problemă are un caracter mult mai complex și presupune o tratare mult mai laborioasă și rafinată decât în cazul pieselor mecanice, având în vedere faptul că parametrii de calitate a imaginii se măsoară la scară nanometrică, în fracțiuni de lungime de undă.

Dificultatea în prescrierea toleranțelor nu este legată de tehnologie, care, în prezent nu poate fi catalogată nici foarte scumpă, nici foarte pretențioasă, ci de imposibilitatea de prevedere a efectelor cumulate ale erorilor pentru fiecare aplicație în parte. Nu există o teorie coerentă, fundamentată matematic, prin care să se poată evalua în faza de proiectare, printr-un algoritm rapid, ingineresc, efectul abaterilor de la dimensiunile și formele nominale ale dioptrilor asupra calității imaginii sistemului. Există încercări de aplicare a statisticii, prin similitudine cu teoria dezvoltată pentru piesele mecanice, însă numărul variabilelor care pot fi implicate în calcul este absolut nesatisfăcător. O piesă mecanică are, în general, un număr

redus de suprafețe active, cu cote și forme funcțional importante. În cazul sistemelor optice intervin un număr extrem de mare de variabile astfel încât extrapolarea teoriei valabile pentru piesele mecanice nu a dat rezultate.

Pentru o lentilă simplă, de exemplu, puterea optică și parametrii de calitate a imaginii se determină funcție de: valorile efective ale celor două raze, abaterile de la forma sferică a dioptrilor, mărimea efectivă a grosimii la centru, descentrarea liniară și unghiulară a celor doi dioptri în raport cu cele trei axe x, y, z , ceea ce introduce un număr de 12 factori de influență.

În cazul sistemelor compuse numărul variabilelor se multiplică proporțional cu numărul componentelor. Totuși, la nivelul actual al capacității sistemelor de calcul, volumul mare de lucru nu ar fi un impediment pentru aplicarea unor algoritmi laborioși. Problema rezidă în ponderea variabilă a parametrilor de influență de la sistem la sistem. Astfel, pentru o lentilă singulară, influența primei curburi asupra aberației sferice poate avea o pondere foarte diferită față de cazul dubletului, tripletului sau al unui sistem compus din mai multe lentile.

Apreciez că cea mai adecvată abordare a problemei este cea numerică. Pentru fiecare aplicație dată este eficientă modelarea și simularea numerică, prin softuri specializate, a erorilor posibile pentru un sistem dat, la care se cunosc datele geometrice rezultate în urma sintezei. Analiza influenței fiecărui parametru geometric și de poziție separat, precum și a influenței acțiunii simultane a acestora, pune în evidență în mod concret factorul de pondere al fiecărei variabile. Pot fi identificate cu certitudine caracteristicile geometrice importante la care sunt sensibili parametrii de calitate urmăriți de aplicația analizată. Se pot indica astfel abateri admise de valori diferite pentru raze și descentrări, în limite raționale, care să vizeze optimizarea atât din punct de vedere tehnic, cât și economic. Scopul final al analizei influenței abaterilor de execuție și montaj este, de fapt, optimizarea calității la costuri cât mai reduse.

Erorile de prelucrare pot fi observate și măsurate la operația de verificare a reperelor optice, după execuția propriu-zisă. Piese care nu se înscriu în limitele admise sunt eliminate.

Erorile de montaj sunt mai puțin controlabile și sunt greu de măsurat în mod direct. Ele apar din cauza jocurilor care se prescriu la montajul componentelor optice în tubul mecanic. Ajustajul cu joc prescris pentru ansamblul montură-componentă optică poate permite fie descentrarea sistemului optic prin deplasare liniară față de axa geometrică a alezajului, fie prin rotirea întregului sistem sau a unor componente ale acestuia în spațiul cilindric permis de ajustaj. Practic, partea optică se împănăază în montură într-o poziție înclinată cu un unghi care depinde de mărimea efectivă a jocului.

Erorile de montaj afectează într-o măsură mai mare calitatea imaginii, comparativ cu cele de execuție. De aceea, alinierea optică, în special pentru sistemele cu multe lentile este

foarte importantă. Din punct de vedere al proiectării, acest deziderat poate fi realizat prin indicarea rațională a abaterilor admise pentru alezajul din tubul mecanic și suprafața cilindrică exterioară a componentelor optice. De asemenea, pentru tuburile mecanice lungi sau de forme complexe, alcătuite din mai multe piese, trebuie avută în vedere în primul rând centrarea precisă, controlată a tuturor elementelor în care se montează părți ale sistemului optic.

Efectul erorilor de montaj este cu atât mai accentuat cu cât sistemul conține mai multe componente. Erorile nu sunt numai cumulate, ci și amplificate de piesele următoare.

1.2. ERORI DE EXECUȚIE

Erorile de execuție sunt diverse și au efecte specifice asupra calității imaginii.

Tabelul 1.1 propune o clasificare a erorilor de execuție și prezintă efectele posibile ale acestora. Figurile 1.1...1.4 schițează profilul sau poziția reală a elementelor de geometrie a lentilelor în raport cu cele nominale.

Tabelul 1.1

Descriere	Schiță	Efecte
1. Abatere de la forma nominală sferică sau asferică a. abatere locală b. abatere globală (rază diferită sau alt tip de suprafață regulată sau oarecare)	b.fig.1.1	a.- distorsiune locală a imaginii - neuniformitate locală a iluminării - scădere locală a contrastului și rezoluției b.- modificarea puterii optice - defocusare - aberații geometrice transversale
2. Abatere de la forma nominală plană a.neregularități locale b.abatere globală (altă formă)	b. fig.1.2	a.- distorsiune locală a imaginii - neuniformitate locală a iluminării b.- modificarea puterii optice - defocusare - aberații geometrice transversale
3. Descentrarea suprafețelor sferice în plan meridian sau sagital (cu intersecția axelor)	Fig.1.3	- efect de prismă (deplasarea imaginilor de-a lungul axelor y sau x) - aberații geometrice axiale și transversale - scăderea rezoluției și contrastului
4. Descentrarea suprafețelor sferice în plan meridian sau sagital	Fig.1.4	- efect de prismă cu aberații geometrice pronunțate

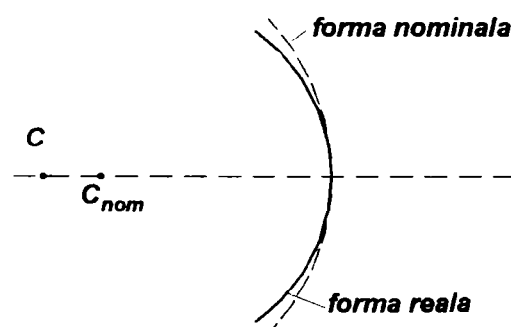


Fig.1.1. Abatere de la forma nominală sferică

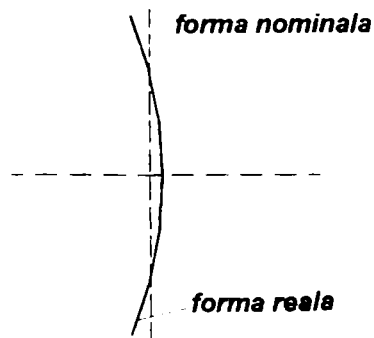


Fig. 1.2. Abatere globală de la forma nominală plană

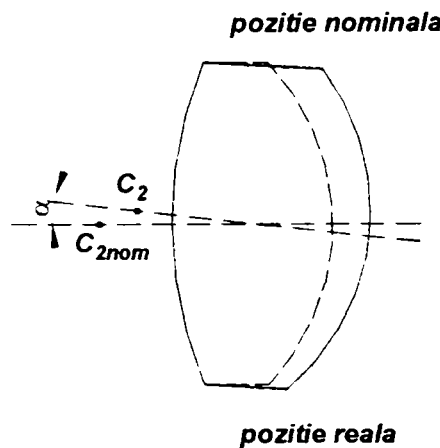


Fig. 1.3. Descentrarea suprafețelor în plan meridian sau sagital (axe intersectate)

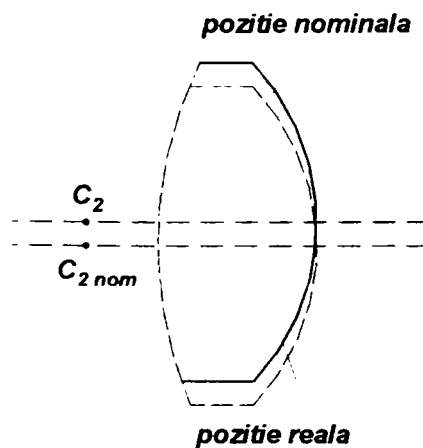


Fig. 1.4. Descentrarea suprafețelor în plan meridian sau sagital (axe paralele)

Precizia de execuție a pieselor optice este impusă prin prescrierile din desenul de execuție, care pe lângă reprezentarea componentei mai conține și un tabel cu indicații privind materialul și dimensiunile.

Pe desenul de execuție al lentilelor se înscriu următoarele cote:

- razele de curbură ale suprafețelor active (valorile numerice au un format fix, cu două zecimale), fără toleranțe. Cotarea razelor de curbură este exemplificată pentru toate cazurile în figura 1.5.

- grosimea la centru (fig.1.6), cu toleranțe. Acestea, în mod uzual, se prescriu pe baza experienței acumulate de producători de componente optice, conform indicațiilor din tabelul 1.2
- dimensiunea fațetelor, cu toleranțe, așa cum sunt indicate în tabelul 1.3. Cotarea fațetelor presupune înscrierea lățimii și a unghiului de înclinare față de o paralelă la axa optică (fig. 1.7).

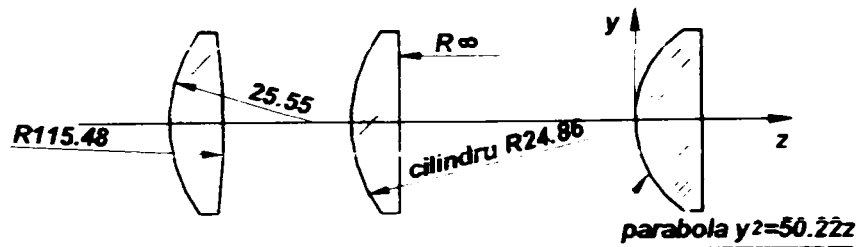
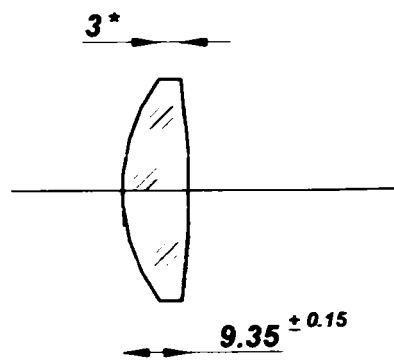


Fig. 1.5. Cotarea razelor lentilelor

- grosimea la margine, notată ca o cotă informativă. Pentru lentilele menisc este recomandată și cotarea gabaritului axial total.



*) cota informativa

Fig. 1.6. Cotarea grosimilor la centru și la margine a lentilelor

- diametrul exterior, cu toleranțe care rezultă din ajustajul cu joc (în general H/f) prescris pentru suprafețele de contact lentilă-montură.

Tabelul 1.2

Tipul aparatului	Denumirea piesei	Toleranțe la grosime [mm]	Toleranțe la centrare [mm]
Telescopice	Sisteme de redresare	0.2...0.3	0.02...0.05
	Obiective	0.1...0.3	0.01...0.05
	Oculare	0.1...0.3	0.01...0.10
Foto și de proiecție	Lentile obiectiv	0.3...0.5	0.005...0.02
Microscopice și aparate de laborator	Obiective		0.003...0.005
	Oculare		0.01...0.05

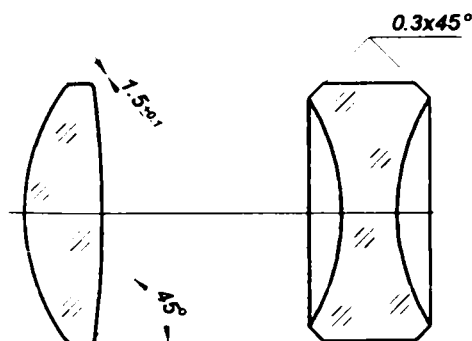


Fig. 1.7. Cotarea fațetelor

Tabelul 1.3

D_u [mm]	Modul de fixare			
	Sertizare		Cu inel filetat	
	ΔD [mm]	$f^{\Delta f}$ [mm]	ΔD [mm]	$f^{\Delta f}$ [mm]
≤ 6	0.6	$0.1^{+0.1}$	-	-
6...10	0.8	$0.3^{+0.2}$	1.0	$0.1^{+0.1}$
10...18	1.0	$1.4^{+0.2}$	1.5	$0.2^{+0.2}$
18...30	1.5	$0.5^{+0.2}$	2.0	$0.3^{+0.2}$
30...50	2.0	$0.7^{+0.3}$	2.5	$0.4^{+0.2}$
50...80	2.5	$1^{+0.5}$	3.0	$0.5^{+0.2}$
80...100	-	-	3.5	$0.6^{+0.4}$
>100	-	-	4.0	$0.7^{+0.5}$

În câmpul desenului, în partea dreaptă sus, se indică valorile nominale ale principalelor caracteristici optice: distanța focală f' , distanțele frontifocale s'_F , s_F și diametrul util D_u .

În partea stângă sus, în câmpul desenului, în formă tabelară, se înscriu condițiile referitoare la tratamente și finisare, materialul optic din care este prelucrată lentila și precizia de execuție a piesei. Acest tabel este comun tuturor pieselor optice.

Pentru toate lentilele care intră în construcția aparatelor optice se prevede o acoperire antireflex pe suprafețele nelipite și o acoperire cu vopsea sau tuș negru mat pe suprafața laterală pentru micșorarea efectelor reflexiilor parazite.

Condițiile pentru material vizează în special proprietățile optice ale acestuia. Proiectantul trebuie să prevadă cel puțin câteva caracteristici de calitate a materialului referitoare la:

- abaterea admisă la indicele de refracție de referință, Δn_e și dispersia medie, $\Delta(n_F - n_C)$ - se înscrie categoria sau direct valoarea parametrilor, conform tabelului 1.4. Variațiile mari ale caracteristicilor optice ale sticlei conduc la creșterea aberațiilor geometrice, respectiv cromatice și diminuează calitatea imaginii.

Tabelul 1.4

Categoria	0	1	2	3	4
Δn_o	$\pm 3 \cdot 10^{-4}$	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 7 \cdot 10^{-4}$	$\pm 10 \cdot 10^{-4}$	$\pm 20 \cdot 10^{-4}$
$\Delta(n_F - n_C)$	$\pm 3 \cdot 10^{-5}$	$\pm 5 \cdot 10^{-5}$	$\pm 7 \cdot 10^{-5}$	$\pm 10 \cdot 10^{-5}$	$\pm 20 \cdot 10^{-5}$

- omogenitate (definită pe cinci categorii, conform tabelului 1.5). Omogenitatea optică se apreciază prin φ/φ_o , care reprezintă raportul dintre unghiul teoretic de separare al aparatului de control și unghiul limită de separare prin semifabricatul de sticlă.

Tabelul 1.5

Categoria	1	2	3	4	5
Raportul maxim φ/φ_o	1	1	1.1	1.2	1.5

- birefrință (apreciată prin șase categorii, așa cum rezultă din tabelul 1.6). Se măsoară ca diferență de drum între raza ordinară și extraordinară pe 1 cm de parcurs prin sticlă.

Tabelul 1.6

Categoria	1	1a	2	3	4	5
Diferența maximă de drum [nm/cm]	2	6	6	10	20	50

- absorbție (apreciată prin șapte categorii, conform tabelului 1.7), prin coeficientul de absorbție α .

Tabelul 1.7

Categoria	000	00	0	1	2	3	4
α [%]	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.5	3.0

- striuri (sau incluziuni filiforme), care au diametrul de ordinul zecimilor de milimetru și se încadrează în două clase după cum examinarea semifabricatului se face după două direcții perpendiculare (clasa A) sau după o singură direcție (clasa B).
- bule (împărțite în 11 categorii și șase clase, detaliate în tabelele 1.8 și 1.9).

Tabelul 1.8

Clasa	1	1a	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Diametrul celei mai mari bule din semifabricat [mm]	nu se admit	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0	2.0	3.0	5.0

Tabelul 1.9

Clasa	A	B	C	D	E	F
Nr. mediu de bule cu diametrul mai mare de 0.03mm într-un kg de sticlă	10	30	100	300	1000	3000

Defectele de material se admit la valorile prevăzute în categoriile medii pentru componente care nu se află într-un plan imagine. Pentru piese aflate într-un plan imagine (reticule, scări gradate) prezența bulelor și a striurilor nu este permisă.

Spațiul rezervat condițiilor pentru piesă se referă la toleranțele admise pentru raze și la centrarea dioptrilor, prin următoarele informații:

- abaterea maximă admisă de la raza suprafețelor active, față de un calibrul optic de verificare, exprimată prin numărul de inele de interferență N admis.
- abaterea maximă admisă de la forma sferică sau plană a suprafețelor active, indicată prin fracțiuni de inele de interferență ΔN . Verificarea abaterilor dimensionale și de formă a suprafețelor optice se face cu ajutorul calibrelor optice, care sunt confecționate din sticlă optică și au forma activă conjugată celei de verificat. Principiul de lucru al calibrului optic are la bază fenomenul de interferență care se manifestă între fasciculele luminoase reflectate de suprafața activă a calibrului și suprafața piesei prelucrate. Datorită diferenței de curbură a calibrului și piesei, între acestea se formează o pană de aer, care introduce o diferență de drum optic între fasciculele reflectate (fig.1.8). În funcție de mărimea penei de aer rezultă un număr de inele (franje) de interferență, care reprezintă o măsură a abaterii razei piesei de la raza calibrului. În zonele cu defecte de formă locale ale suprafeței prelucrate apar distorsiuni de la forma circulară a inelelor, pe porțiuni ΔN de inel, care semnalizează prezența acestor abateri de formă (fig.1.9). În lumină policromatică, albă, inelele de interferență sunt colorate. Ele se disting în ordinea albastru-roșu dacă pana de aer dintre piesă și calibrul este un menisc convergent (raza efectivă mai mare decât cea nominală) sau roșu-albastru, dacă pana de aer are forma unui menisc divergent (raza efectivă a dioptrului este mai mică decât cea nominală).

Abaterile majore globale de formă conduc la deformarea inelelor de interferență circulare, care pot deveni ovale sau degenerază în formă de șa. Aceste aspecte impun declararea lentilei ca necorespunzătoare calitativ.

- abaterile de la centrarea razelor admise CR_1 și CR_2
- clasa de precizie a calibrului de lucru ΔR_1 și ΔR_2
- clasa de acuratețe.

În practică, prescrierea toleranțelor la prelucrare a pieselor optice se bazează pe experiența dobândită în construcții anterioare și formularea prin analogie a unor cerințe destinate sistemelor noi. Tabelul 1.10 recomandă alegerea abaterilor limită la prelucrarea pieselor optice, conform indicațiilor producătorilor cu tradiție în domeniu.

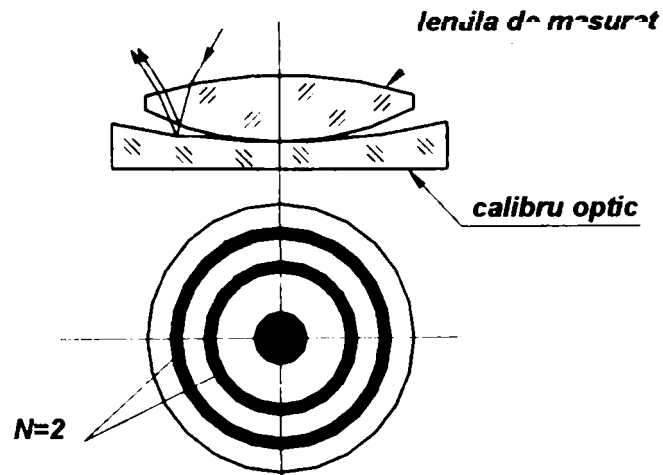


Fig. 1.8. Principiul de măsurare a abaterilor dimensionale ale razelor cu calibrul optic

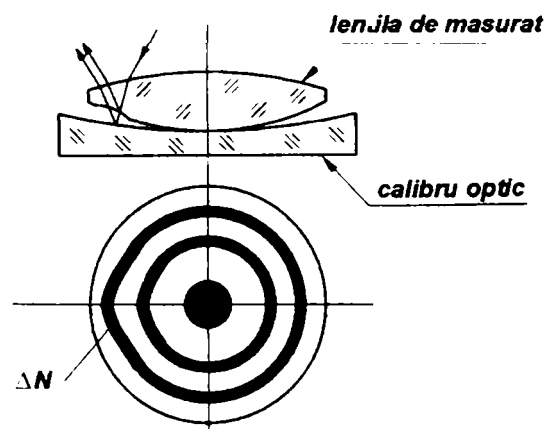


Fig. 1.9. Punerea în evidență a abaterilor locale de formă cu calibrul optic

Tabelul 1.10

Tipul de piesă	Tipul de aparat	Subansamblul, piesa sau suprafața	Numărul de inele de interferență
Lentile	Aparate telescopice	Colectoare	5...10
		Redresoare	3...5
	Obiective	3...5	
	Oculare	3...6	
	Aparate foto și de proiecție	Obiective	2...5
	Microscopae și aparate de laborator	Obiective	1...3
		Oculare	3...5
Lame plan-paralele	Aparate vizuale Aparate de control și reglare Calibre optice	Reticule	10...18
		Filtre	3...5
		Oglinzi	0.2...0.3
		Calibre plane	0.1...0.2
Prisme de reflexie	Aparate telescopice	Dioptrii de reflexie de precizie medie	1...2
		Dioptrii de refracție	2...4
	Aparate de control și reglare	Suprafețe de reflexie de la prisme de precizie	0.1...0.2
Suprafețe de reflexie de la prisme cu acoperiș		0.05...0.2	
Pene optice de precizie	Aparate de control și reglare	Suprafețe de reflexie ale prismelor cu acoperiș	0.05...0.2

Acuratețea suprafețelor optice se referă la defectele mecanice de suprafață admisibile (puncte, zgârieturi, rizuri, știrbituri etc.), vizibile în condiții standardizate, care precizează caracteristicile sursei de iluminare, fondul pe care se controlează piesele, grosimentul lupei de aspectare.

Suprafețele optice pot fi încadrate în nouă clase de acuratețe, stabilite conform tabelului 1.11.

Clasa I de acuratețe se impune obligatoriu componentelor care se găsesc în planul imaginilor reale.

Clasele II-VI ierarhizează defectele în funcție de un diametru convențional de aspectare, D_c , care se calculează cu relația:

$$D_c = 2h_{\max} \frac{D_o}{D_p}, \quad (1.1)$$

unde h_{\max} reprezintă înălțimea de incidență a razei marginale pe componentă, D_p este diametrul pupilei de ieșire a sistemului, iar D_o – diametrul convențional al pupilei de ieșire.

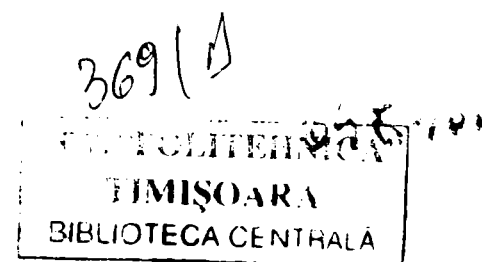
Tabelul 1.11

Clasa	f' lupă	D_c [mm]	Puncte admise		Rizuri admise		Distanța minimă între defecte [mm]
			Diametrul max[mm]	Număr maxim	Lățime [mm]	Lungime totală maximă [mm]	
I-10	<15		0.004	9	0.002	Jumătate din diametrul piesei	
I-20	15-30		0.010	9	0.004		
I-40	>90		0.015	9	0.008		
II		<0.5	0.05		0.004		0.5
III		0.5-1.5	0.10		0.005		1.5
IV		1.5-4.5	0.25		0.010		4.5
V		4.5-10	0.50		0.020		10
VI		>10	1.30		0.050		25
VII	dimensiunile defectelor nu se standardizează						

Regulile enunțate mai sus sunt ilustrate în figura 1.10, care redă, spre exemplificare, reprezentarea și cotarea unei lentile.

Grupurile de două sau trei lentile lipite, care formează dublete sau triplete, se reprezintă separat, în desene de subansamblu, în care se precizează suplimentar: descentrarea admisă după lipire C (fig.1.11), clasa de bule a asamblării, clasele de acuratețe pentru suprafețele lipite și cele exterioare, distanța focală, diametrul util, materialul de lipire.

Figura 1.12 prezintă un exemplu de reprezentare și cotare a unui dublet.



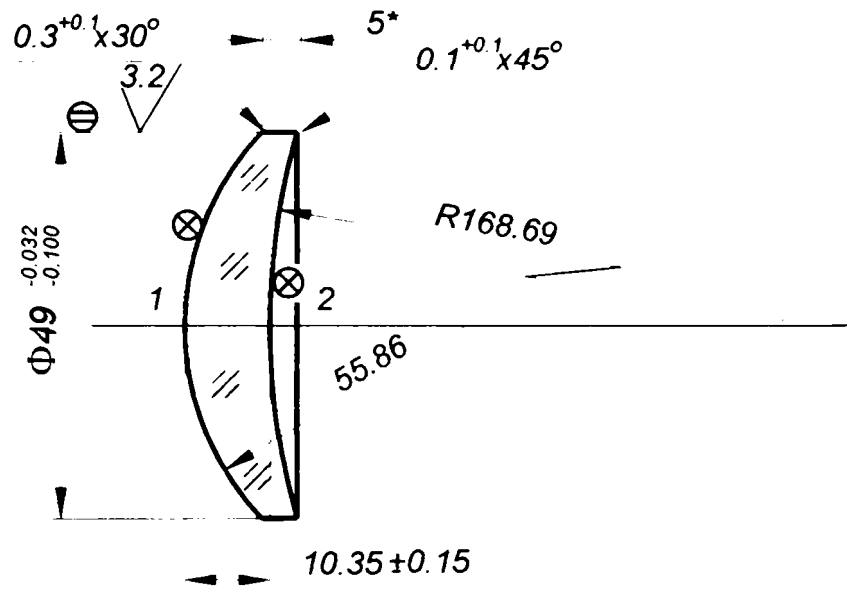


Fig. 1.10. Detaliu al desenului de execuție al unei lentile. Reprezentarea și cotarea componentei conform standardelor în vigoare

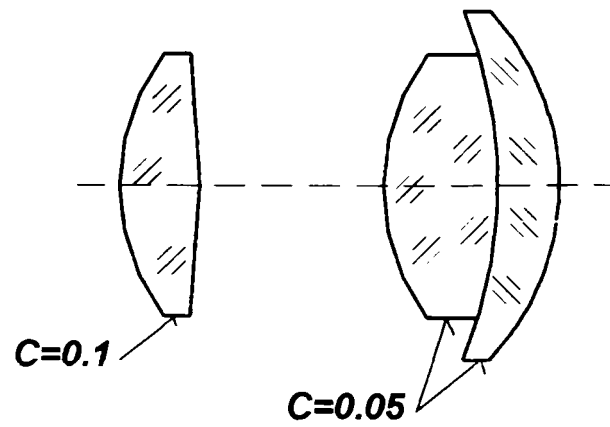


Fig. 1.11. Cotarea descentrării admise pentru execuția lentilelor

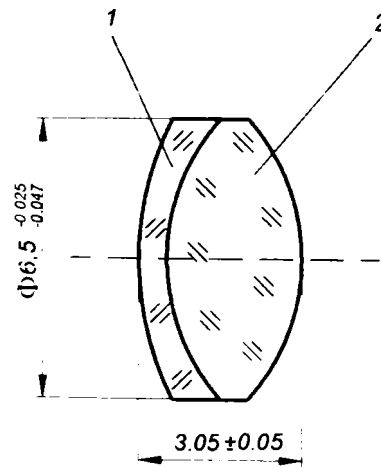


Fig. 1.12. Detaliu al desenului de subansamblu pentru un dublet

Desenul de execuție al unei prisme conține reprezentarea piesei, cotate astfel încât să rezulte dimensiunile liniare și unghiulare care o definesc complet. Trebuie precizate, utilizând linia întreruptă, zona utilă a fiecărei suprafețe active. Dacă este cazul, se indică prin litera A muchia principală, utilizată ca bază pentru măsurare.

Lungimile muchiilor care mărginesc fețele prismei se tolerează funcție de ajustajele pe care le formează piesa optică și montura. Cele mai importante cote din punct de vedere optic sunt unghiurile. Toleranțele acestora variază în limite foarte largi, funcție de destinația piesei și se încadrează într-un domeniu care se extinde de la câteva minute la câteva secunde de grad.

Condițiile pentru material se înscriu tabelar și sunt similare celor prezentate pentru lentile. Condițiile pentru piesă, specificate în tabel vizează următoarele elemente:

- abaterea maximă de la forma plană globală și abaterea maximă locală de la planitate, care se înscriu tot sub forma numărului de inele de interferență N și respectiv ΔN . Verificarea suprafețelor plane se realizează, de asemenea, cu calibre optice. Numărul de linii atribuit în tabel acestor elemente depinde de numărul de suprafețe optic active ale prismei.
- abaterea maximă admisă la piramiditate π .
- dedublarea maximă admisă (pentru prismele cu acoperiș).
- unghiul limită de separare α .
- clasa de precizie a calibrului.
- clasa de acuratețe.

În figura 1.13 este redat un detaliu al desenului de execuție al unei prismei.

Desenul de execuție al lamelor plan-paralele se întocmește după regulile valabile pentru prisme și are în vedere faptul că cea mai importantă condiție pe care trebuie să o îndeplinească piesa este paralelismul fețelor. Dacă lama servește ca suport pentru un filtru, pe desen se înscriu condițiile referitoare la materialul colorat sau la depunerile necesare. Dacă piesa îndeplinește rolul de reticul sau scară gradată, desenul include și un detaliu de gravare (fig.1.14). Reticulul se execută normal sau răsturnat funcție de acțiunea sistemului optic care îl proiectează spre observator. Precizia de citire a gradațiilor depinde de precizia de execuție a reperelor liniare.

Reticulele de precizie medie impun toleranțe la lungime între 0.001 și 0.01 mm și toleranțe la unghiuri de $1' \dots 5'$, în timp ce pentru reticule de precizie grosolană aceste toleranțe sunt mai largi: 0.1 mm pentru lungimi și $5'$ pentru unghiuri.

Reticulele sunt pretențioase în ceea ce privește paralelismul fețelor, care se tolerează cu $5' \dots 15'$ și planeitatea, pentru care se prevede o abatere echivalentă cu 5...15 inele de interferență.

Acuratețea impusă reticulelor se încadrează în clasele I-10, I-20 sau I-40 pentru aparate de observare, respectiv în clasele I, II pentru microscopie. Zona centrală a reticulului (cca o treime din diametru) trebuie să fie lipsită total de defecte, iar următoarea treime să nu conțină aglomerări de defecte.

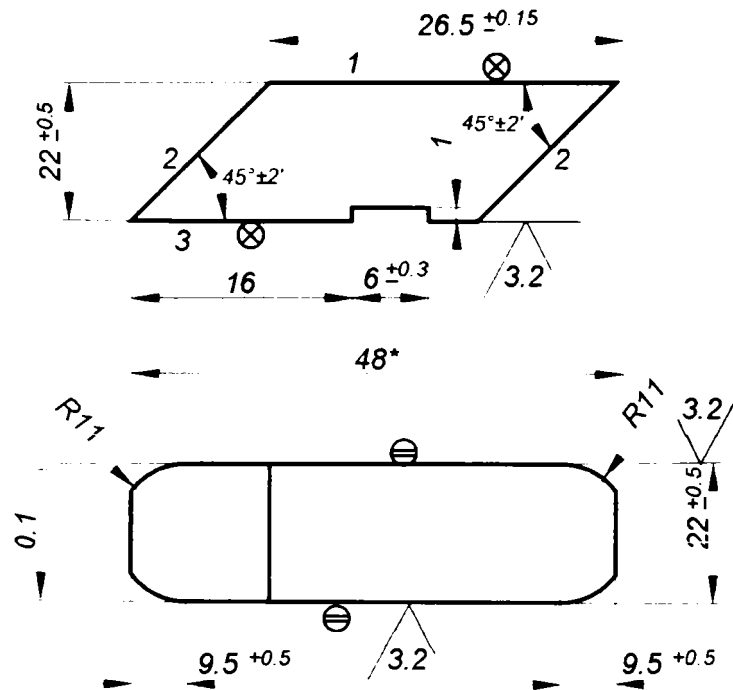


Fig.1.13. Detaliu al desenului de execuție al unei prisme

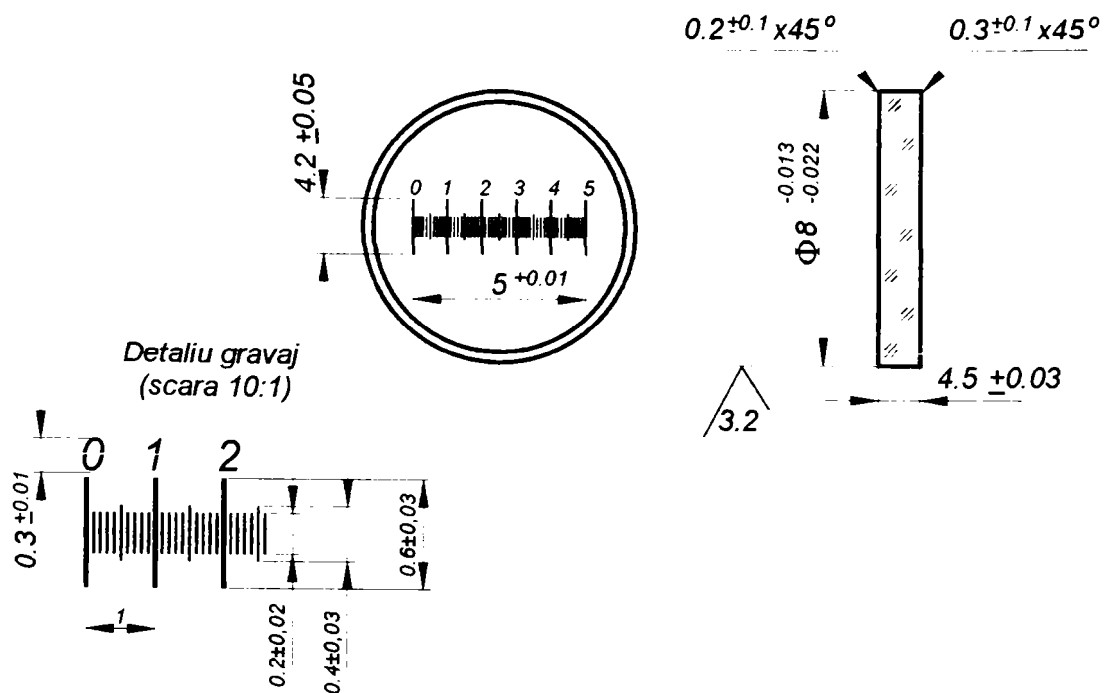


Fig.1.14. Detaliu al desenului de execuție al unui reticul

Reperetele reticulului se execută prin așchiere, atac chimic sau fotogravare, fiecare procedeu având sorturi de sticlă indicate.

Detaliul de gravare trebuie să precizeze valoarea diviziunii scării, grosimea și adâncimea reperelor, tipul și culoarea vopselei de umplere dacă este cazul, excentricitatea gravajului față de axele de simetrie.

Figura 1.14 redă un detaliu al desenului de execuție al unui reticul.

În cazul tuturor reperelor, subansamblurilor sau sistemelor optice, utilizarea materialelor indicate la condițiile pentru material, în clasele sau categoriile prescrise, execuția mecanică și montajul cu respectarea toleranțelor înscrise pe desen, trebuie să asigure caracteristicile optice detaliate, de obicei, în câmpul desenului, în partea dreaptă, sus.

Înscriserea acestor caracteristici este obligatorie pentru lentile sau sisteme optice formate din componente lenticulare și trebuie să conțină cel puțin indicatori privind caracteristicile de referință. Dacă pentru acestea se prescriu și toleranțe, atunci documentația trebuie să conțină explicit metoda și mijlocul de măsurare a fiecărui parametru tolerat.

În tabelul 1.12 sunt prezentați parametrii gaussieni și toleranțele lor uzuale, precum și descrierea sintetică a importanței lor pentru sistemul optic, respectiv mijlocul de măsurare necesar.

Tabelul 1.12

Parametrul	Toleranța	Importanța	Mijloc de măsurare
Distanța focală, f	1...2%	Poziția focarului, respectiv a imaginii	Banc optic
Numărul de deschidere, f/D	$<\pm 5\%$	Iluminarea în planul imagine	Geometric
Unghiul de câmp, ω	$<\pm 2\%$	Extinderea imaginii	Banc optic
Mărirea liniară, β	$<\pm 2\%$	Poziția planelor conjugate	Banc optic
Frontifocala imagine, S'_F	$\pm 5\%$	Poziția imaginii	Banc optic
Transmitanță, τ	$>0.98^n$, unde n este numărul de componente	Energia totală la ieșirea din sistem	Spectrofotometru
Vignetare	$<20\%$ la marginea câmpului	Uniformitatea iluminării în planul imagine	Spectrofotometru

Elementele înscrise în tabelul 1.12 au un caracter de maximă generalitate. Pentru fiecare aplicație, parametrii prezintă importanțe relative diferite. Pentru un aparat de proiecție, de exemplu, distanța focală foarte exactă este mai puțin importantă decât iluminarea uniformă și de o anumită valoare în planul imagine. În acest caz, desenul poate conține explicit valoarea iluminării în I_x , apertura numerică cu toleranțe strânse și vignetarea nulă.

Alte caracteristici, privind calitatea imaginii, pot fi indicate atât pe desenele de

execuție ale lentilelor, cât și pe cele de ansamblu ale sistemelor optice. Metodele moderne de apreciere a calității imaginii nu mai necesită prescrierea explicită a valorilor admisibile pentru aberațiile geometrice și cromatice, ci utilizează parametri sintetici, cum ar fi aberația de undă. Aceasta se exprimă prin valoarea statistică RMS OPD (root mean square optical path difference), cel mai adesea. Pentru impunerea unor parametri de tipul rezoluției sau contrastului se fac referiri la MTF (modulation transfer function).

Și în cazul acestora se fac prescrieri generale sau exacte, funcție de aplicație. Pentru un sistem optic destinat citirii codurilor de bare, de exemplu, se indică direct valoarea rezoluției necesare sistemului în perechi de linii/mm.

1.3. ERORI DE MONTAJ

Erorile de montaj nu pot fi decelate individual ci pot fi apreciate ca prezente prin verificarea experimentală, prin testare, a fiecărui produs finit care include un sistem optic.

Tabelul 1.13 prezintă o sinteză a acestui tip de erori, ilustrate în figurile 1.15...1.19.

Tabelul 1.13

Descriere	Schița	Efect
1. Deplasarea axială a lentilei în raport cu poziția nominală pe axa optică	fig.1.15	- deplasarea planului imagine (defocusare dacă poziția receptorului este fixă cu scăderea dramatică a parametrilor difracționali)
2. Deplasare transversală a lentilei în raport cu poziția nominală pe axa y sau x	fig.1.16	- aberații geometrice transversale în plan meridian și sagital
3. Înclinarea lentilei a. planele principale sunt rotite în raport cu vârful unui dioptru b. planele principale sunt rotite în raport cu punctul principal obiect c. planele principale sunt rotite în raport cu un punct de pe axa optică d. planele principale sunt rotite în raport cu un punct oarecare din spațiul obiect sau imagine	poz. a. fig.1.17 poz. b. fig.1.18 poz. c. fig.1.19	- deplasarea planului imagine - distorsiunea imaginii - aberații geometrice axiale și transversale - parametri difracționali scăzuți (rezoluție, contrast și iluminare globală drastic micșorate)

Deprecierea calității imaginii datorită erorilor de montaj poate fi minimizată prin prescrierea unor toleranțe corespunzătoare atât pentru piesele optice, cât și pentru cele mecanice. În primul rând trebuie impuse ajustaje raționale pentru montarea părții optice în locașele din tuburile mecanice. În acest sens sunt vizate direct abaterile admise pentru alezajul mecanic și gabaritul radial al pieselor optice. Pentru respectarea distanțelor axiale dintre componentele sistemului optic, conform calculului de proiectare, se urmărește controlul dimensiunilor tubului mecanic prin cotarea adecvată a alezajelor care urmăresc

direcția axei optice.

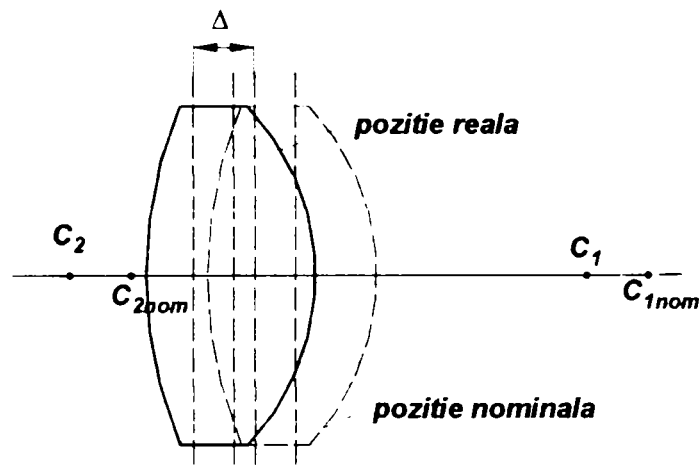


Fig. 1.15. Deplasarea axială a lentilei în raport cu poziția nominală pe axa optică

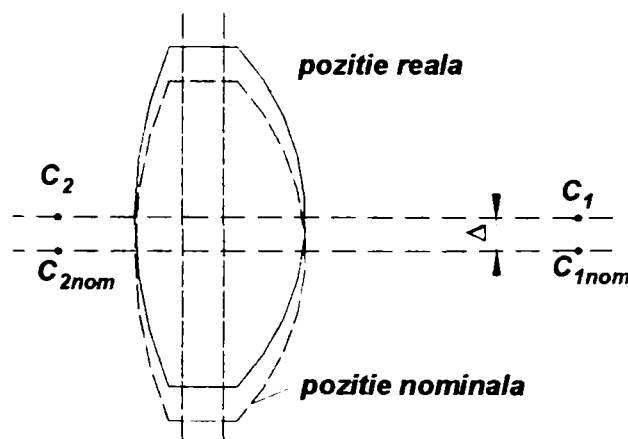


Fig. 1.16. Deplasare transversală a lentilei în raport cu poziția nominală pe axa y sau x

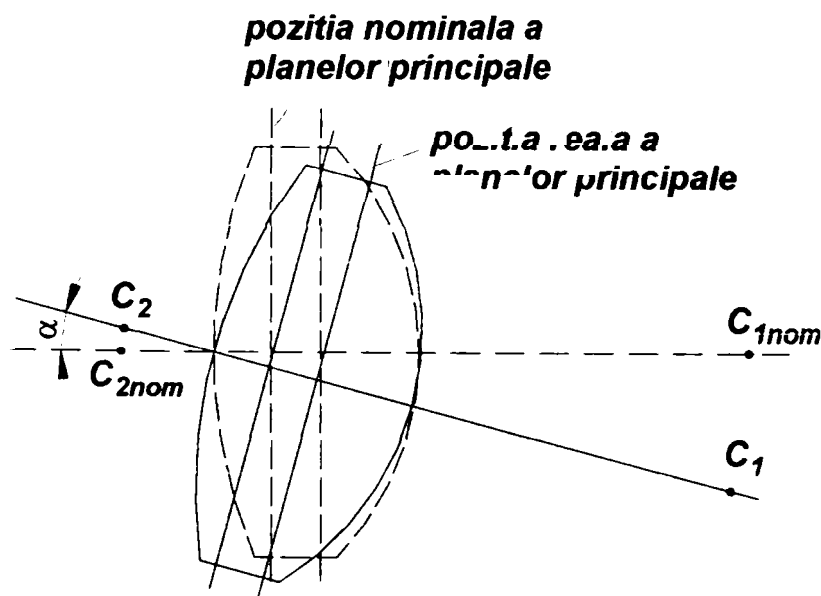


Fig. 1.17. Plane principale rotite în raport cu vârful dioptrului

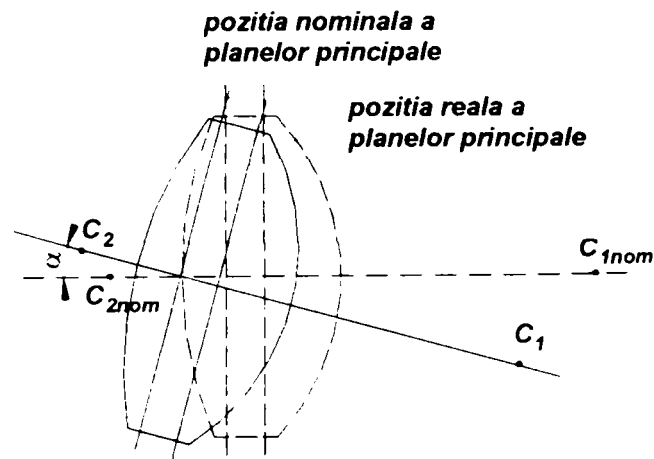


Fig. 1.18. Plane principale rotite în raport cu punctul principal obiect

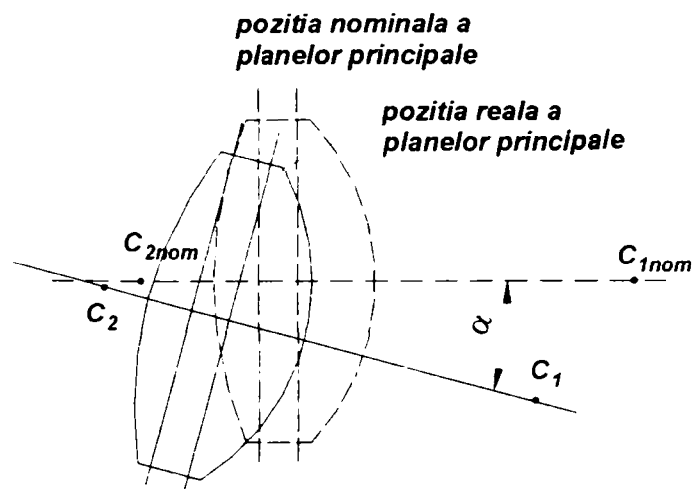


Fig. 1.19. Plane principale rotite în raport cu un punct oarecare din spațiul obiect sau imagine

După cum rezultă din paragrafele anterioare, în prezent, prescrierea toleranțelor, atât pentru execuție, cât și pentru montaj, se face empiric, pe baza unor recomandări rezultate exclusiv în urma experienței de producție. Optimizarea sistemului optomecanic din faza de proiectare, cu certitudinea obținerii unui produs performant presupune un demers teoretic sau de modelare-simulare, care să personalizeze și din punct de vedere al abaterilor admise fiecare aplicație în parte.

Teoretic, este greu de determinat o relație analitică între mărimea fiecărei erori și parametrii de calitate a imaginii (aberații geometrice și cromatice, diagrama spot, funcția imagine a punctului, funcția optică de transfer etc.). Totuși, dezvoltarea actuală a metodelor numerice, răspândirea și capacitatea sistemelor de calcul, permit simulări repetate care să indice sensul și viteza de variație a parametrilor de calitate a imaginii în raport cu erorile de execuție sau montaj. Practic, pentru fiecare aplicație concretă trebuie anticipată influența posibilelor erori și stabilite toleranțe pentru acestea, astfel încât parametrii de calitate a imaginii să se încadreze în limitele impuse de aplicație, limite care sunt dictate de rezoluția receptorului.

1.4. STUDIUL ANALITIC AL ERORILOR DE MONTAJ

Teoretic, este greu de determinat o relație analitică între mărimea fiecărei erori și parametrii de calitate a imaginii. Cu atât mai dificil ar fi un demers prin care să se aibă în vedere efectul cumulat al unui șir de erori.

Ilustrativ, se prezintă în continuare un studiu al înclinării unei lentile prin rotirea în jurul vârfului primului dioptru.

Din punct de vedere al poziției unei lentile în raport cu un sistem de referință legat de axa optică, se consideră că cele mai reprezentative caracteristici ale componentei lenticulare sunt punctele (planele) principale și nodale. Aceste elemente de referință se pot găsi după montaj în poziții diferite față de cele nominale, în raport cu care pot fi deplasate de-a lungul uneia dintre axe sau pot fi rotite în jurul unui punct de pe axa optică sau din afara ei.

Cea mai complexă și în același timp cea mai probabilă eroare este rotația lentilei în jurul unui punct oarecare. Acesta se poate afla în interiorul lentilei sau undeva în vecinătatea acesteia. Poziția sa nu este cu adevărat importantă pentru că distanțele sunt foarte mici. De importanță reală sunt unghiurile de rotire. În continuare, se acceptă ipoteza simplificatoare potrivit căreia centrul de rotație al lentilei se află în vârful primului dioptru (fig.1.20). Ipoteza nu este departe de realitate și este convenabilă din punct de vedere matematic.

În figura 1.20 este reprezentat primul dioptru în poziția nominală (cu linie întreruptă) și poziția reală (cu linie continuă) și sunt puse în evidență deplasările și rotația centrului de curbură în planul zy.

Dacă este de interes, se pot calcula deplasările axială și transversală ale centrului de curbură:

$$\begin{cases} \Delta y = r \sin \alpha \\ \Delta z = r(1 - \cos \alpha) \end{cases} \quad (1.2)$$

Pentru a determina traseul unei raze incidente pe suprafața sferică înclinată, drumuirea trigonometrică prin sisteme centrate, evident, nu este potrivită. Se pot obține relații speciale pentru acest caz, descriind pozițiile relative ale elementelor geometrice (fig. 1.21).

Se consideră cunoscute raza suprafeței r , indicii de refracție din mediul obiect și imagine n și n' și poziția obiectului (prin distanța obiect s și unghiul de înclinare al razei incidente față de axa optică σ). Relația geometrică (1.2) permite determinarea unghiului de incidență prin ecuația (1.3):

$$SM = s \sin \sigma = SH + HM = r \sin(\sigma - \alpha) + r \sin(-)i, \quad (1.3)$$

$$\sin i = \sin(\sigma - \alpha) - \frac{s \sin \sigma}{r} \quad (1.4)$$

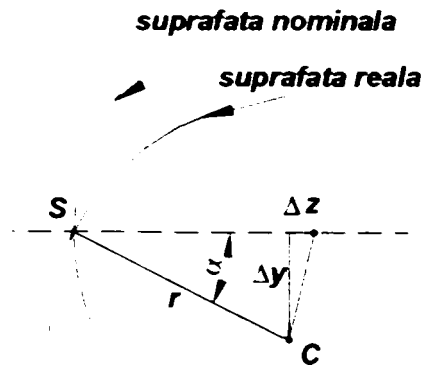


Fig. 1.20. Elementele geometrice de caracterizare a poziției centrului primului dioptru pentru o lentilă înclinată

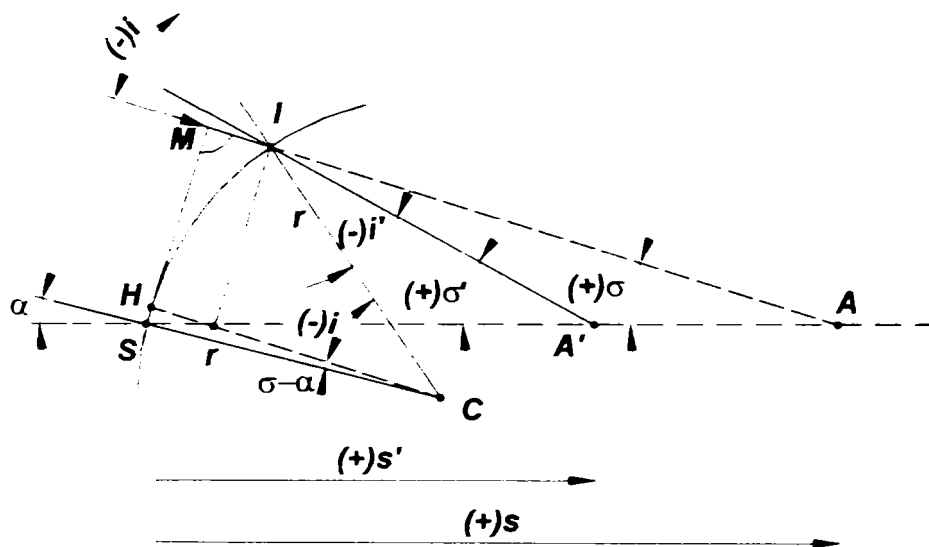


Fig. 1.21. Elemente geometrice utilizate pentru trasarea razelor luminoase printr-o suprafață înclinată

Ceilalți trei pași ai drumuirii, similari drumuirii trigonometrice tradiționale permit determinarea unghiului de emergență ϵ' , a unghiului σ' și a distanței imagine s' :

$$\sin i' = \frac{n}{n'} \sin i, \quad (1.5)$$

$$\sigma' = \sigma - i + i', \quad (1.6)$$

$$s' = r \left[\frac{\sin(\sigma' - \alpha) - \sin i'}{\sin \sigma'} \right]. \quad (1.7)$$

Trecerea la dioptrul următor se face, de asemenea, în mod obișnuit:

$$\begin{cases} s_{j-1} = s_j - d_{j,j-1} \\ \sigma_{j-1} = \sigma_j \end{cases} \quad (1.8)$$

Mersul de calcul prezentat este aplicat, spre exemplificare, pentru o lentilă convergentă caracterizată prin următoarele elemente: $r_1=101.63$ mm, $r_2= - 101.63$ mm, $n=1.517$ (BK7), $d=10$ mm, $D= 50$ mm, $s= - 150$ mm, $\sigma_{\max}= 10^\circ$, $f'=100$ mm. Cu ajutorul drumuirilor s-a determinat aberația sferică axială și transversală, ca fiind cea mai reprezentativă aberație geometrică. Calculul este reiterat pentru diverse deschideri ($\sigma=(0\dots 10^\circ)$) și unghiuri de înclinare($\alpha=[0\dots 10^\circ]$).

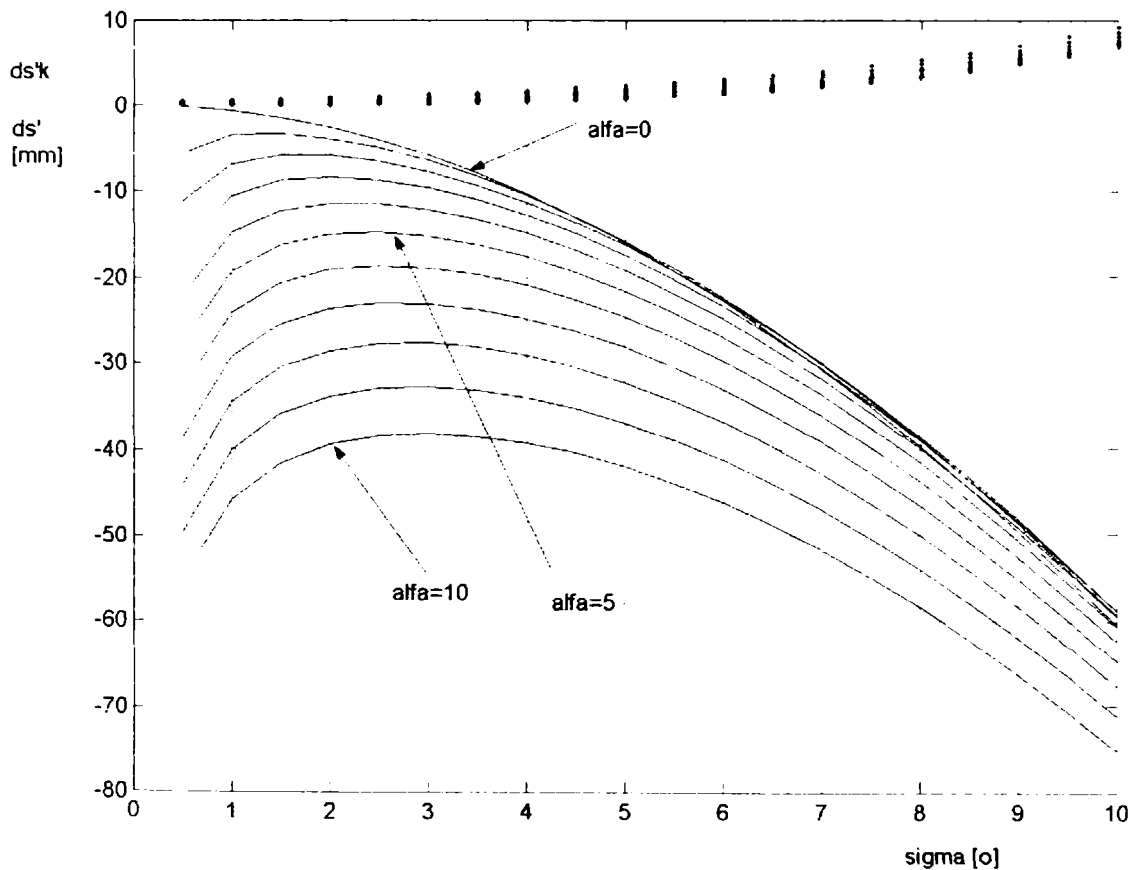


Fig. 1.22. Aberația sferică axială și transversală pentru înclinări între $1^\circ \dots 10^\circ$

Figura 1.22 prezintă sintetic un grafic al aberației axiale (ds') și transversale ($ds'k$).

Se observă că înclinarea introduce creșteri majore ale aberației sferice. De asemenea, se poate urmări alura deosebită a curbelor cu $\alpha \neq 0$ față de curba de referință $\alpha=0$ care are o variație monoton crescătoare. Aberația transversală este afectată de înclinare în sensul creșterii sale cu până la 50% față de lentila dreaptă.

În figura 1.23 este reprezentată aberația sferică axială datorită exclusiv înclinării. La unghiuri mici de înclinare, așa cum probabil apar în realitate, se observă că aberația datorită exclusiv defectului de poziție este crescătoare aproximativ liniar în raport cu mărimea erorii.

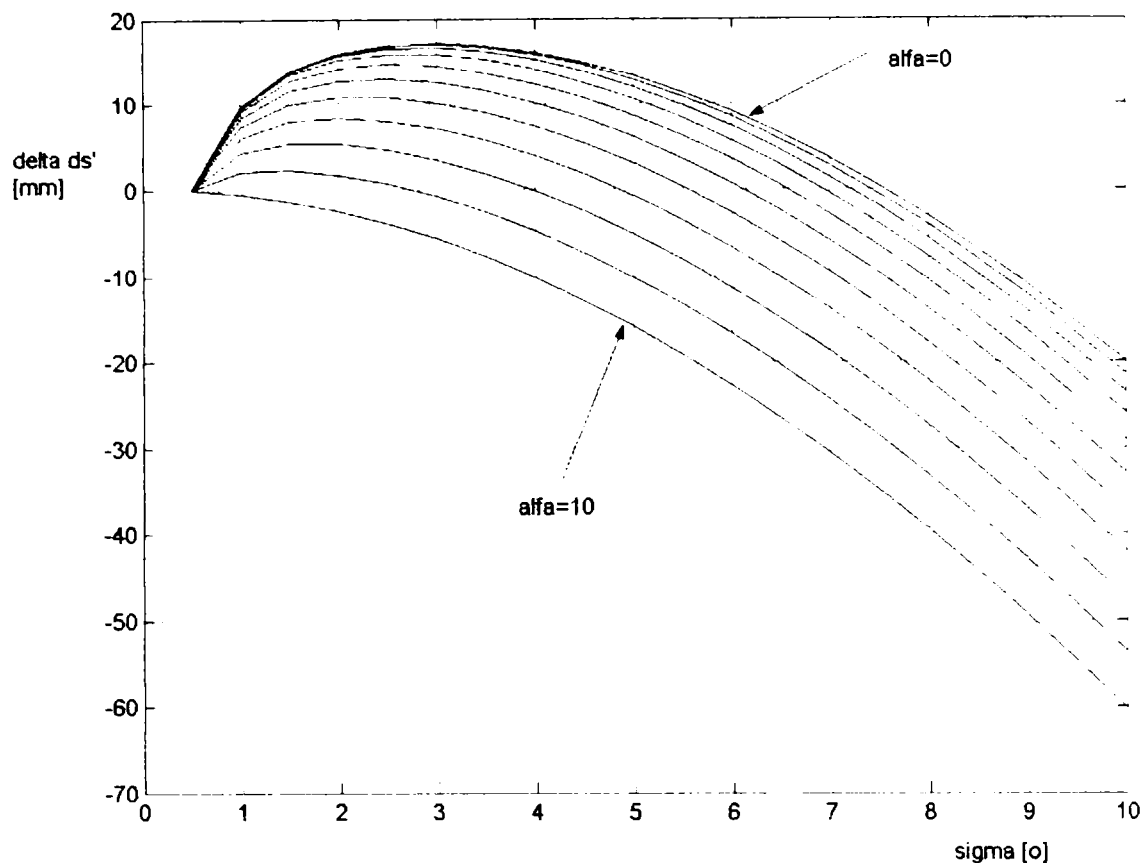


Fig.1.23. Aberația sferică axială datorită exclusiv înclinării lentilei cu diferite unghiuri ($\alpha=0 \dots 10^\circ$)

Cu un oarecare efort se pot imagina algoritmi de calcul pentru modelarea oricărei erori de montaj sau de execuție, dar este greu de realizat un demers sintetizator, care să le cuprindă pe toate.

Soluția se află în domeniul analizei numerice. Aceasta are la bază suportul geometriei analitice tridimensionale, care modelează razele ca drepte spațiale și utilizează legile refracției și reflexiei pentru a descrie efectul dioptrilor asimilați unor suprafețe spațiale. Definirea numerică a acestor elemente permite modelarea erorilor de orice tip.

Modelarea și simularea numerică sunt accesibile prin modulele specializate ale unor programe de calcul optic automat, care au avantajul unui timp de calcul redus. Dezavantajul metodelor numerice constă în faptul că nu oferă concluzii cu caracter general ci trebuie aplicate fiecărui sistem în parte.

1.5. TOLERANȚELE PARAMETRILOR DE CALITATE A IMAGINII ȘI CORELAREA LOR CU TOLERANȚELE DE EXECUȚIE ȘI MONTAJ A LENTILELOR

Proiectarea unui sistem optic este completă atunci când ansamblul, subansamblurile

și reperele optice conțin, pe desenele de execuție sau ansamblu, toate specificațiile privind cotele, caracteristicile și toleranțele admise pentru acestea.

Întreaga analiză în domeniul difracțional, al mărimilor de ordinul lungimilor de undă, are sens în măsura în care valorile caracteristicilor geometrice și de material ale componentelor se înscriu în toleranțe suficient de strânse pentru a nu afecta rezultatele analizei.

Înainte de stabilirea abaterilor de execuție și de montaj a pieselor optice, se pune problema tolerării a însăși parametrilor difracționali de calitate a imaginii. În principiu, se consideră limitat la difracție și, ca urmare, de foarte bună calitate, un sistem pentru care parametrul sintetic $RMS\ OPD < 0.07\lambda$ (sau $OPD < 0.25\lambda$). Aceste performanțe sunt, însă, în directă legătură cu costurile de fabricație și nu se justifică pentru toate aplicațiile. Cu caracter informativ, în tabelul 1.14, sunt prezentate valorile toleranțelor pentru sistemele optice clasificate, după criteriul calității, în trei mari categorii: comerciale, precise și limitate la difracție.

Tabelul 1.14

Parametru	Toleranțe pentru sistem optic comercial	Toleranțe pentru sistem optic precis	Toleranțe pentru sistem optic limitat la difracție
RMS OPD	0.25λ	0.1λ	$<0.07\lambda$
OPD	2λ	0.5λ	$<0.25\lambda$
Grosime pe axă	0.1mm	0.01mm	0.001mm
Raze	1%	0.1%	0.01%
Indice de refracție de referință	0.001	0.0001	0.00001
Nr. Abbe	1%	0.1%	0.01%
Omogenitate	0.0001	0.00001	0.000002
Descentrare	0.1mm	0.01mm	0.001mm
Înclinare	1min	10sec	1sec
Sfericitate	2 inele	1 inel	0.25 inele
Abateri locale de formă (neregularități)	1inel	0.25inele	<0.1 inele

Datele din tabelul 1.13 trebuie interpretate mai ales în sensul observației că obținerea unui plus de calitate presupune creșterea prețului de fabricație cu un factor mult mai mare decât al îmbunătățirii performanțelor sistemului.

În plus, trebuie avut în vedere faptul că influența erorilor unei caracteristici geometrice sau de montaj nu este aceeași pentru orice sistem. De exemplu, aceleași abateri ale razelor r_1, r_2, \dots, r_k într-un sistem format din k dioptri, vor avea ponderi diferite la stabilirea RMS OPD sau MTF a sistemului.

În aceste condiții, pentru fiecare sistem proiectat, trebuie simulate toleranțele impuse parametrilor de execuție și montaj și pot rezulta abateri admise foarte diferite pentru șirul de

raze sau de grosimi la centru. Datele înscrise în tabelul 1.13 sunt indicate ca abateri de inițiere a studiului toleranțelor raționale pentru un sistem optic.

În principiu, se proiectează sistemul optic, se analizează din punct de vedere al calității considerând execuția și montajul ideale, apoi, stabilind categoria de calitate în care trebuie să se încadreze produsul final, se impune o toleranță, respectiv valorile admise pentru un parametru difracțional (RMS OPD sau MTF, în general). Se simulează, individual, abateri ale fiecărui element de influență din sistem și se determină valorile RMS OPD sau se trasează grafic MTF. Valoarea totală a RMS OPD se poate determina statistic, cu relația aproximativă:

$$\text{RMS OPD} = \sqrt{\sum_i \text{RMS OPD}^2}, \quad (1.9)$$

unde i este numărul de ordine al parametrului considerat.

S-a subliniat caracterul aproximativ al legii de compunere a RMS OPD după relația (1.9) pentru că erorile pe care le poate introduce pot fi mari în sensul că rezultatul este posibil să fie mai mare sau mult mai mare decât valoarea reală. Acest aspect apare ca urmare a faptului că, întâmplător, unele abateri la valoarea razelor, grosimilor sau indicilor de refracție pot chiar îmbunătăți valoarea RMS OPD și, probabil, o lege de compunere algebrică și conținând factori de pondere ar fi mai realistă.

Stabilirea factorilor de pondere este, însă, foarte dificilă. Ea poate fi realizată, dar este laborioasă, necesitând studii ale variației influențelor individuale.

1.6. CONCLUZII

Calculul optic tradițional, sub toate formele sale, are la bază ipoteza caracterului ideal al geometriei sistemelor optice. Algoritmii de sinteză și analiză consideră dioptrii ca având forme nominale (sferică, plană sau asferică) și poziții pe axa optică astfel încât sistemul să fie perfect centrat.

Sistemele optice reale sunt afectate de erori care diminuează valorile parametrilor de calitate a imaginii, față de caracteristicile modelelor ideale analizate în faza de proiectare.

Erorile care afectează calitatea imaginii sistemelor optice se pot clasifica în două mari categorii: erori de execuție și erori de montaj.

Erorile de execuție se referă la abaterile dimensionale și de formă a componentelor sau subansamblurilor lipite. Clasificarea lor și ilustrarea grafică a diferențelor dintre poziția nominală și reală a elementelor geometrice sunt redată în tabelul 1.1 și figurile 1.1...1.4.

Erorile de montaj se manifestă datorită prelucrării cu abateri dimensionale, de formă și poziție a tuburilor mecanice și jocurilor determinate de ajustajele prescrise la asamblarea

componentelor optice în monturi. Clasificarea teoretică și materialul ilustrativ aferent sunt prezentate în tabelul 1.13 și figurile 1.15...1.19.

Cotarea și prescrierea toleranțelor pentru piesele optice fac obiectul unor standarde dedicate reprezentării și înscrierii elementelor specifice pieselor optice. Desenul de execuție conține explicit indicarea valorii nominale și a abaterilor admise pentru grosimea la centru, gabaritul radial și fațetele lentilelor. Raza, indicată într-un format cu două zecimale, este tolerată prin numărul de inele de interferență admis la aspectarea cu calibrul optic. Defectele globale de formă nu sunt admise, iar cele locale sunt limitate prin fracțiuni de franjă. La prisme cele mai importante elemente geometrice sunt unghiurile, care se tolerează cu o precizie care este impusă de aplicație.

Regulile de reprezentare și cotare a pieselor optice sunt exemplificate prin desenele de execuție pentru lentilă, prismă și reticul, conform figurilor 1.12...1.14.

Toleranțele pentru dimensiunile pieselor optice, în prezent, se aleg empiric, pe baza unor recomandări tabelare ale producătorilor de aparate optice. În funcție de grupa de aparate și tipul subansamblului se indică un interval în care se pot prescrie toleranțele pentru raze (tab.1.10), grosimi la centru și centrare (tab.1.2). Alegerea abaterilor maxime admise cu ajutorul acestor indicații foarte generale riscă fie să nu asigure calitatea estimată, fie să impună inutil costuri suplimentare.

Un model matematic sau o metodologie sistematică de apreciere a influenței erorilor de execuție asupra calității sistemelor optice nu există în literatură. Dezvoltarea analitică a unei teorii coerente este practic imposibilă datorită numărului ridicat de variabile și a ponderii de influență a fiecărei variabile, pondere care variază de la sistem la sistem. Chiar dacă se analizează influența unui singur element geometric asupra unui singur parametru de calitate se constată că gradul de corelație și viteza de variație a influenței sunt funcții personalizate, punctuale, strict legate de o aplicație dată.

Pentru a studia efectul erorilor de execuție sau montaj asupra parametrilor de calitate a imaginii este necesară ierarhizarea acestora, în sensul stabilirii caracteristicilor prioritare pentru fiecare tip de aplicație. Conform standardului de reprezentare și cotare a pieselor optice, parametrii de calitate importanți se înscriu pe desenele de execuție sau de ansamblu. Se pune problema tolerării acestora, în sine, înainte și în legătură directă cu impunerea abaterilor elementelor geometrice ale pieselor. Principalele caracteristici ale sistemelor optice și toleranțele lor, într-o formulă de maximă generalitate sunt redată în tabelul 1.12.

În privința parametrilor de calitate a imaginii, se poate urmări încadrarea într-un interval prescris a oricăruia dintre ei (aberații geometrice și cromatice, parametri difracționali, OPD, RMS OPD). Se preferă însă un parametru sintetic și reprezentativ, care poate fi echivalat cu oricare dintre ceilalți parametri geometrici, ondulatorii sau Fourier. Acest parametru este diferența de drum optic (OPD) sau rădăcina medie pătratică a diferenței

optice de drum (RMS OPD). Valorile acestui indicator permit clasificarea globală a sistemului optic în categorii de calitate, conform tabelului 1.13.

Se consideră că pentru studiul influenței erorilor de execuție și montaj asupra calității imaginii unui sistem optic format din k dioptri este necesară analiza următoarelor dependente:

- RMS OPD(Δr_i) – influența abaterilor de la raza nominală a fiecărui dioptru separat
- RMS OPD(Δd_i) – influența abaterilor de la grosimea nominală a fiecărei lentile
- RMS OPD(Δy_i) – influența descentrării pe direcția axei y a fiecărui dioptru
- RMS OPD(α_i) - influența înclinării în raport cu axa x a fiecărui dioptru
- RMS OPD(β_i) – influența înclinării în raport cu axa y a fiecărui dioptru
- RMS OPD(γ_i) - influența înclinării în raport cu axa z a fiecărui dioptru
- RMS OPD($\Delta r, \Delta d, \Delta y, \alpha, \beta, \gamma$) – influența abaterilor cumulate ponderate funcție de nivelul și viteza de variație deduse din analizele anterioare

Un paragraf al prezentului capitol este dedicat ilustrării analizei influenței unei erori de montaj asupra unui parametru de calitate a imaginii și anume studiul aberației sferice axiale și transversale funcție de înclinarea lentilei în raport cu vârful primului dioptru.

Având în vedere observațiile de mai sus, se formulează următoarele obiective ale tezei:

- Sistematizarea erorilor de execuție și montaj, în scopul decelării tuturor influențelor posibile asupra calității imaginii. Literatura, foarte săracă în tratarea acestui subiect conține abordări generale sau trunchiate. Definirea fiecărui tip de eroare va permite modelarea sa numerică și analiza influenței sale prin gradul de corelație și viteza de variație în raport cu un parametru semnificativ de caracterizare a imaginii
- Realizarea unui studiu complex al influenței erorilor de execuție și montaj, individual și cumulat, prin modelare-simulare numerică pentru entitățile de bază din structura sistemelor optice: lentila singulară, dubletul lipit, tripletul lipit și a unor combinații uzuale ale acestora. Se urmărește variația puterii și a RMS OPD (eventual și raportul Strehl) ca cele mai semnificative caracteristici ale sistemului optic în raport cu abaterile razelor, grosimilor la centru, descentrării în plan meridian și înclinării în raport cu axa y , considerate ca cele mai importante elemente de influență
- Rafinarea recomandărilor tabelare existente cu indicații concrete privind abaterile maxime admise pentru raze, grosimi, descentrări și înclinări pentru structurile analizate, în condițiile menținerii calității în domeniul limitat la difracție
- Studiul experimental al erorilor de montaj asupra aberațiilor geometrice.

În prezentul capitol pot fi marcate următoarele elemente originale:

- Sinteza unui material bibliografic extins, care cuprinde atât titluri clasice, cât și cele

mai noi apariții pe plan autohton și internațional, cu privire la erorile de execuție și montaj ale pieselor optice

- Sistematizarea și ilustrarea adecvată a posibilelor erori de prelucrare și montaj, cu precizarea influenței negative asupra calității imaginii
- Analiza numerică a influenței înclinării asupra aberației sferice axiale și transversale a unei lentile singulare

Bibliografie: [B3], [B4], [C1], [C4], [C5], [D2], [G4], [G5], [G6], [G7], [G8], [G12], [H2], [H4], [J2], [M1], [N1], [N3], [N5], [N6], [O1], [P8], [P9], [S1], [S2], [S3], [S5], [S6], [S9], [S10], [S11], [S14], [S15], [W1], [W2], [W4], [W5], [W22]

2. PARAMETRII DE APRECIERE A CALITĂȚII IMAGINII

2.1. GENERALITĂȚI

Calitatea imaginii este noțiune complexă, care denumește generic un set de parametri, a căror natură și valoare poate diferi de la aplicație la aplicație.

În sensul cel mai general, imaginea formată de un sistem optic are o calitate corespunzătoare dacă este asemenea cu obiectul și reproduce fidel culoarea acestuia în toate punctele componente. La modul absolut, asemănarea perfectă, pentru orice punct din planul imagine, este realizată numai de sistemele optice ideale, descrise prin dioptrica de ordinul I. Doar în domeniul gaussian formarea imaginii are atribute ideale (este stigmatică, aplanatică și ortoscopică).

Sistemele optice reale lucrează cu fascicule de deschidere și înclinare mari față de axa optică pentru a asigura câmpurile obiect impuse și luminozitatea corespunzătoare în planul imagine. În consecință, imaginile formate de sistemele optice reale sunt afectate de erori geometrice, a căror mărime nu depinde numai de deschiderea și înclinarea fasciculelor luminoase, ci și de forma dioptrilor și densitatea optică a mediilor, ceea ce determină diferențe de drum între punctele aparținând aceluiași front de undă și, ca urmare, deformarea acestuia.

Din punct de vedere al reproducerii culorii, numai utilizarea luminii pur monocromatice asigură un răspuns spectral ideal. În realitate, majoritatea aparatelor optice lucrează cu lumină albă, în domeniul vizibil, sau cu lumină policromatică în domeniul IR sau UV. Sistemele laser sunt singurele pentru care analiza cromatică a imaginii poate fi omisă.

Metodele de analiză a sistemelor optice au definit o multitudine de parametri geometrici, ondulatorii sau Fourier, care descriu performanțele sistemului în ceea ce privește asemănarea, claritatea, distribuția spectrală a iluminării, contrastul și rezoluția în planul imagine. Algoritmii de calcul au un caracter laborios, dar furnizează informații de un deosebit rafinament.

În prezent, analiza calității imaginii se realizează cu ajutorul unor softuri dedicate, care furnizează date complete despre sistemul optic studiat: caracteristici de referință, aberații longitudinale și transversale, primare, de ordinul cinci și totale, diagrama spot, funcția imagine a punctului, funcția optică de transfer.

2.2. ABERAȚII OPTICE

2.2.1. Generalități

Sistemele optice reale formează imagini cu erori de geometrie și de culoare, denumite generic aberații. Numeric, aberațiile reprezintă diferențe între valorile reale ale unor

parametri (abscise, înălțimi de incidență, înălțimi ale imaginilor) și valorile de referință ale acelorași parametri, determinați în dioptrica de ordinul I.

Din punct de vedere istoric, aberațiile geometrice și cromatice au constituit timp îndelungat singurele criterii de apreciere a calității imaginii. Completarea setului de parametri de calitate cu indicatori ondulatorii și Fourier s-a realizat în ultimele decenii. Abordarea ondulatorie permite echivalențe între parametrii geometrici și Fourier.

Aberațiile optice se clasifică în două mari categorii:

- aberații geometrice
- aberații cromatice.

Aberațiile geometrice conform clasificării tradiționale inițiate de Seidel sunt:

- aberația de sfericitate (sau de deschidere)
- coma
- astigmatismul
- curbura de câmp
- distorsiunea.

Primele două sunt specifice fasciculelor largi, de deschidere mare, iar ultimele trei, fasciculelor înguste și înclinate față de axa optică. Tendința actuală este de analiză concomitentă a astigmatismului și curburii câmpului, care sunt în strânsă legătură. Aberațiile geometrice și se manifestă și în lumină monocromatică.

Policromatismul radiației care traversează sistemele optice determină manifestarea aberațiilor cromatice, care se asociază celor geometrice.

2.2.2. Aberația de undă

Toate aberațiile pot fi descrise în termeni care apelează natura ondulatorie a luminii și pot fi echivalate cu erorile de formă și dimensiuni ale frontului de undă. În mod generic, abaterile de la forma și poziția frontului de undă ideal sunt denumite aberație de undă sau diferență de drum optic.

La sistemele optice care prezintă aberații geometrice, fronturile de undă reale diferă de cele ideale - sferice și centrate în punctul imagine. Fronturile de undă reale pot fi sferice dar au curbura mai mare sau mai mică decât cea a sferei de referință sau pot avea forme asferice, funcție de aberația care se manifestă în sistem.

În figura 2.1 este prezentat efectul aberației sferice introduse de o lentilă convergentă biconvexă, asupra fronturilor de undă emergente. Acestea își păstrează forma sferică, dar au raza de curbură mai mică decât cea a sferei de referință.

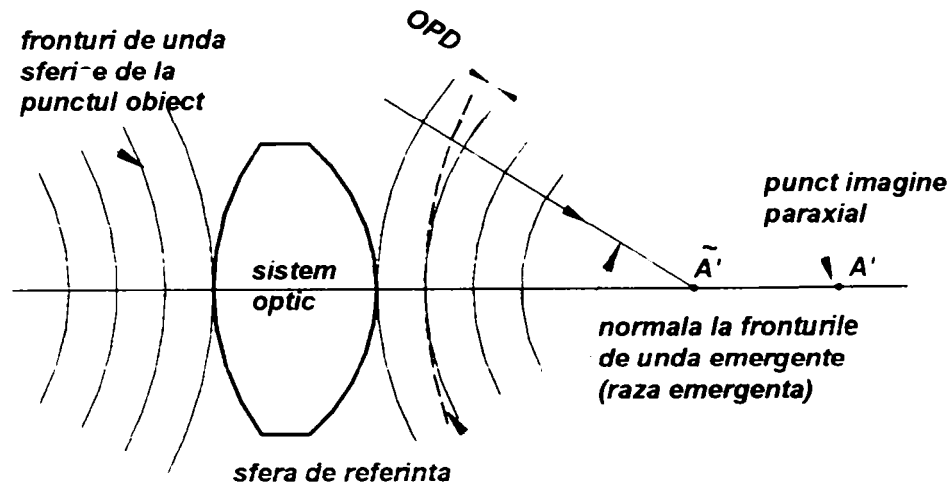


Fig.2.1. Aberația sferică a unei lentile convergente (sistem optic convergent) determină curbarea suplimentară a fronturilor de undă emergente

În figură este reprezentată sfera de referință centrată în punctul imagine paraxial A' și sferile având curburi mai accentuate, corespunzătoare deschiderii maxime. Raza emergentă marginală este locul geometric al unui punct pe fronturile succesive, are direcția normală la fronturi și intersectează axa optică în punctul imagine extraaxial \tilde{A}' . Pe direcția razei sferei de referință, distanța dintre sfera reală și cea de referință reprezintă aberația de undă sau diferența de drum optic (OPD).

Aberația de undă se exprimă în număr de lungimi de undă și, ca urmare, apelarea ei în interpretarea celorlalte aberații are sens numai dacă acestea au valori mici, de ordinul de mărime al lungimilor de undă.

OPD reprezintă un parametru de calitate important. Conform criteriului Rayleigh, sistemele limitate la difracție au OPD mai mic decât un sfert de lungime de undă.

2.2.3. Efectul de difracție al diaframelor

Din punct de vedere ondulatoriu, un sistem optic ideal, lipsit de aberații, nu formează imaginea unui punct obiect tot într-un punct. Acest deziderat s-ar realiza numai în cazul deschiderilor infinite. Deschiderile finite ale diaframelor și monturilor sistemului vor determina efecte de difracție caracteristice. Imaginea unui punct, datorită acestor efecte, este de fapt o pată de difracție, cu dimensiuni finite și o distribuție energetică neuniformă.

Iluminarea în planul imagine este distribuită într-o serie de inele luminoase și întunecate alterante. În mijlocul figurii de difracție se află un cerc de luminozitate maximă.

Pentru deschiderea circulară a diafragmei, distribuția intensității luminoase în planul imagine este de forma:

$$I = I_0 \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{m}{2} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{m^2}{2^2 2!} \right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{m^3}{2^3 3!} \right)^2 + \frac{1}{5} \left(\frac{m^4}{2^4 4!} \right)^2 - \dots \right]^2 = I_0 \left[\frac{2J_1(m)}{m} \right]^2 \quad (2.1)$$

unde $m = \frac{\pi D \sin \alpha}{\lambda}$, (2.2)

iar $J_1(m)$ este funcția Bessel de ordinul I.

Studiul relației (2.1) indică o scădere rapidă a iluminării de la pata luminoasă centrală numită cercul sau pata Airy la inelele luminoase concentrice dinspre periferia figurii de difracție.

În tabelul 2.1 sunt prezentate caracteristicile numerice privind dimensiunile și iluminarea petei Airy și a inelelor înconjurătoare.

Tabelul 2.1

Nr. de ordine al inelului	r	Iluminare relativă	Energia luminoasă a inelului
maxim central	0	1.000	83.9%
primul inel întunecat	$0.61\lambda/n'\sin\sigma'$	0.0	
primul inel luminos	$0.82\lambda/n'\sin\sigma'$	0.017	7.1%
al doilea inel întunecat	$1.12\lambda/n'\sin\sigma'$	0.0	
al doilea inel luminos	$1.33\lambda/n'\sin\sigma'$	0.0041	2.8%
al treilea inel întunecat	$1.62\lambda/n'\sin\sigma'$	0.0	
al treilea inel luminos	$1.85\lambda/n'\sin\sigma'$	0.0016	1.5%
al patrulea inel întunecat	$2.12\lambda/n'\sin\sigma'$	0.0	
al patrulea inel luminos	$2.36\lambda/n'\sin\sigma'$	0.00078	1.0%

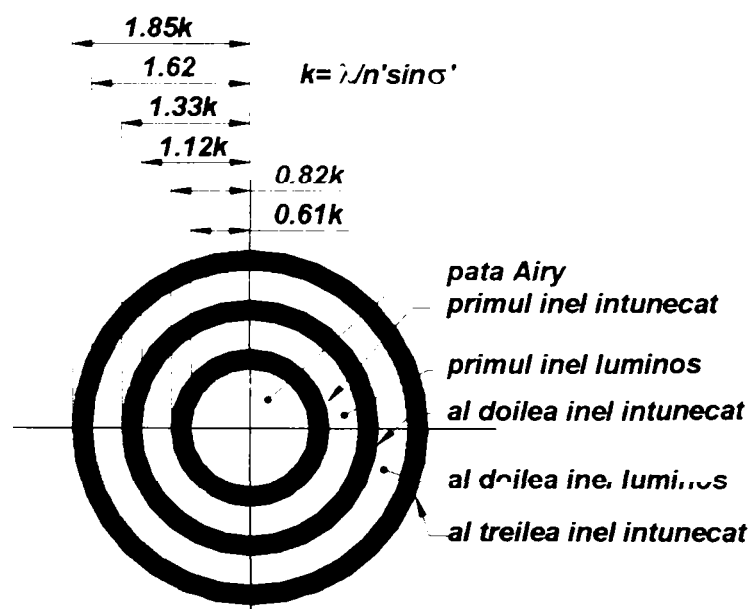


Fig.2.2. Distribuția iluminării în figura de difracție obținută pentru un sistem optic ideal

Se observă că 84% din energia totală a figurii de difracție se află în pata Airy, unde

iluminarea este de aproape 60 de ori mai intensă decât în primul inel luminos. În general, sunt semnificative pata centrală și primele două inele (fig.2.2), celelalte fiind prea slabe pentru a mai fi sesizate, indiferent care ar fi receptorul.

De reținut este faptul că prezența aberațiilor conduce la modificări ale formei, dimensiunilor și distribuției energetice a figurii de difracție descrise anterior.

Valoarea normalată a raportului dintre iluminarea în pata Airy obținută cu un sistem optic dat și iluminarea în pata Airy a sistemului ideal (limitat la difracție) reprezintă un parametru de calitate a imaginii numit Raportul Strehl.

2.2.4. Aberații geometrice

2.2.4.1. Aberația sferică

Aberația sferică (de deschidere sau de apertură) apare la formarea imaginii în fascicule largi și are ca efect variația abscisei imagine funcție de apertură (fig.2.3).

Aberația de sfericitate se redă grafic printr-o curbă reprezentând variația abscisei imagine sau a distanței focale imagine în funcție de apertura sistemului. Analitic, aberația de sfericitate axială sau longitudinală se exprimă prin diferența maximă a absciselor sau a distanțelor focale ce provin de la un fascicul incident:

$$ds' = \tilde{s}' - s' \text{ sau } ds' = \tilde{f}' - f'. \quad (2.3)$$

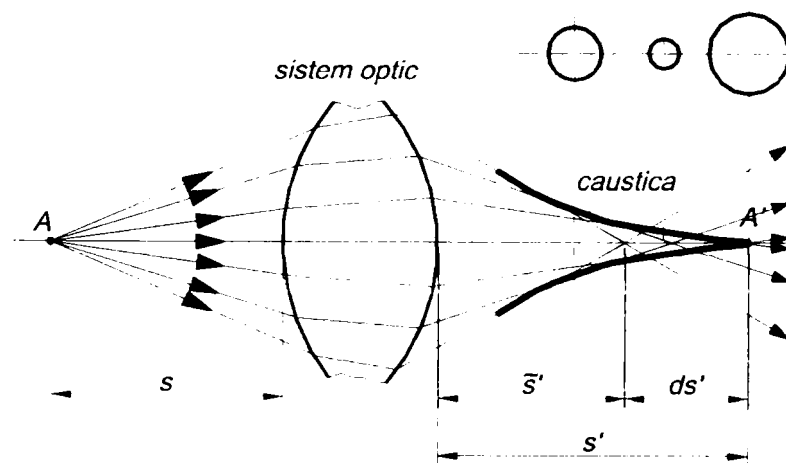


Fig.2.3. Forma fasciculului emergent la sisteme optice reale afectate de aberație sferică

În cazul lentilelor convergente, aberația este negativă și lentila se numește subcorectată. În cazul lentilelor divergente aberația se consideră pozitivă și lentila se numește supracorectată.

Pentru aceeași distanță focală și deschidere, aberația de sfericitate se schimbă în funcție de forma lentilei și de orientarea acesteia față de planele conjugate obiect-imagine.

Aberația de sfericitate transversală se notează cu dy' (fig.2.4) și se exprimă prin relația:

$$dy' = ds' \cdot \operatorname{tg} \tilde{\sigma}'_k. \quad (2.4)$$

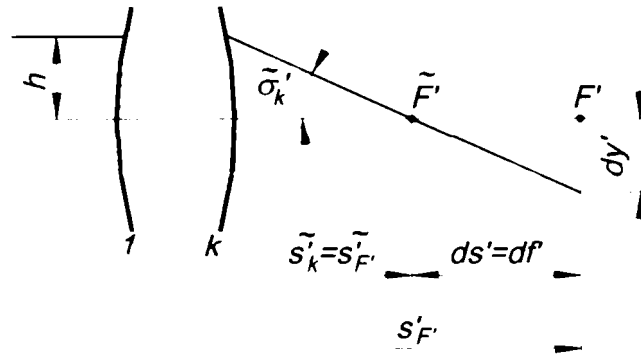


Fig.2.4. Aberația sferică transversală

Aberația sferică transversală reprezintă un parametru important de calitate a imaginii pentru că mărimea sa este o măsură a neclarității imaginii.

Stabilirea toleranțelor pentru aberația sferică se poate face implicând diferența de drum optic OPD. Aplicând criteriul Rayleigh, se impune condiția ca OPD să nu depășească $\lambda/4$ și se obține valoarea admisibilă a aberației sferice longitudinale:

$$ds'_{M\max} = \pm \frac{4\lambda}{n' \sin^2 \tilde{\sigma}'_M} = \pm 16\lambda \left(\frac{f'}{D} \right)^2. \quad (2.5)$$

Aberația sferică transversală admisă va fi:

$$ds'_{kM\max} = \pm \frac{4\lambda}{n' \sin \tilde{\sigma}'_M} = \pm 8\lambda \left(\frac{f'}{D} \right). \quad (2.6)$$

Dacă sistemul este bine corectat și $ds'_M=0$, toleranțele pentru aberația sferică zonală longitudinală și transversală sunt:

$$ds'_{z\max} = \pm \frac{6\lambda}{n' \sin^2 \tilde{\sigma}'_M}, \quad (2.7)$$

$$ds'_{kz\max} = \pm \frac{4.2\lambda}{n' \sin \tilde{\sigma}'_M}. \quad (2.8)$$

2.2.4.2. Coma

Coma este o aberație geometrică determinată de înclinarea și deschiderea mare a fasciculelor care pornesc de la puncte extraaxiale. Ea poate fi privită ca o aberație sferică în cazul punctelor extraaxiale.

În figura 2.5 este prezentată o lentilă pe care este incident un fascicul paralel înclinat. Razele marginale (1) și (2) determină imaginile de înălțime $\tilde{y}'_1 = \tilde{y}'_2$ diferită de y' - înălțimea corespunzătoare imaginii formate cu ajutorul razei pupilare principale. Diferența dintre

înălțimile imaginilor $\tilde{y}'_{1,2}$ și y' definește coma tangențială:

$$k_T = \tilde{y}'_{1,2} - y'. \quad (2.9)$$

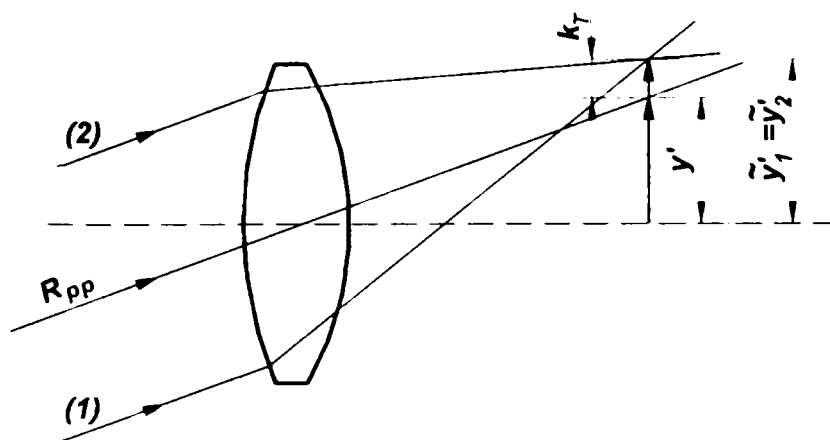


Fig.2.5. Coma tangențială în cazul unui fascicul paralel înclinat

Coma este o aberație cu efecte negative puternice asupra calității imaginii datorită formei asimetrice a petei luminoase și a distribuției neuniforme a luminii în această pată.

Mărimea aberației este influențată de forma lentilelor și de poziția tuturor monturilor din sistemul optic. De asemenea, este direct proporțională cu depărtarea punctului obiect față de axa optică în planul xy . Ca urmare, coma este una dintre aberațiile care limitează câmpul util obiect, respectiv imagine, deoarece, de la centru spre margine, imaginea devine tot mai neclară.

Relația pentru calculul comei tangențiale este de forma:

$$k_T = \tilde{y}'_1 - y'_p + \frac{(\tilde{y}'_1 - \tilde{y}'_2)(\text{tg}\tilde{\sigma}'_1 - \text{tg}\tilde{\sigma}'_p)}{\text{tg}\tilde{\sigma}'_2 - \text{tg}\tilde{\sigma}'_1} \cong \frac{\tilde{y}'_1 + \tilde{y}'_2}{2} - y'_p. \quad (2.10)$$

Coma sagitală se poate determina funcție de cea tangențială:

$$k_s = \frac{1}{3}k_T. \quad (2.11)$$

Toleranța pentru aberația de comă, stabilită pe baza criteriului Rayleigh $\lambda/4$ aplicat OPD, este:

$$k_T = \pm \frac{1.5\lambda}{n' \sin\tilde{\sigma}'}. \quad (2.12)$$

Valorile indicate de relația (2.12) sunt rareori respectate practic, fiind extrem de dificil de corectat un sistem optic la un astfel de nivel pentru un câmp obiect rațional. În majoritatea aplicațiilor, coma depășește mult această toleranță.

2.2.4.3. Astigmatismul și curbura de câmp

Astigmatismul este o aberație geometrică datorată înclinării mari a fasciculelor înguste față de axa optică. În figura 2.6 este reprezentată o lentilă care formează imaginea unui obiect linear AB. Din punctul extraaxial B pomește un fascicul luminos incident pe suprafața lentilei după un cerc ale cărui diametre în plan tangențial și sagital au fost notate M_1M_2 și S_1S_2 . Planul meridian sau tangențial este determinat de axa optică și raza pupilară principală. Planul sagital este perpendicular pe planul tangențial și conține raza pupilară principală. Planul sagital este perpendicular pe planul tangențial și conține raza pupilară principală.

Datorită asimetriei celor două plane față de axa optică refracțiile sunt diferite formându-se două imagini distincte ale punctului B în B'_M , la intersecția razelor marginale meridiane și, respectiv B'_S , la intersecția razelor marginale sagitale.

Dacă în spațiul obiect fasciculul incident are secțiune circulară, după refracția pe sistemul optic, în spațiul imagine secțiunea acestuia este variabilă. Imediat după lentilă, fasciculul emergent are secțiune circulară, care devine eliptică, având axa mare în plan sagital. În punctul B'_M elipsa devine o dreaptă $S'_1S'_2$. În continuare, secțiunea are formă circulară (și reprezintă pata de cea mai mică difuzie), apoi devine eliptică, având axa mare în plan tangențial. Pentru obiect situat la infinit, liniile $M'_1M'_2$ și $S'_1S'_2$ reprezintă liniile de focar tangențial, respectiv sagital (*focarele Sturm*).

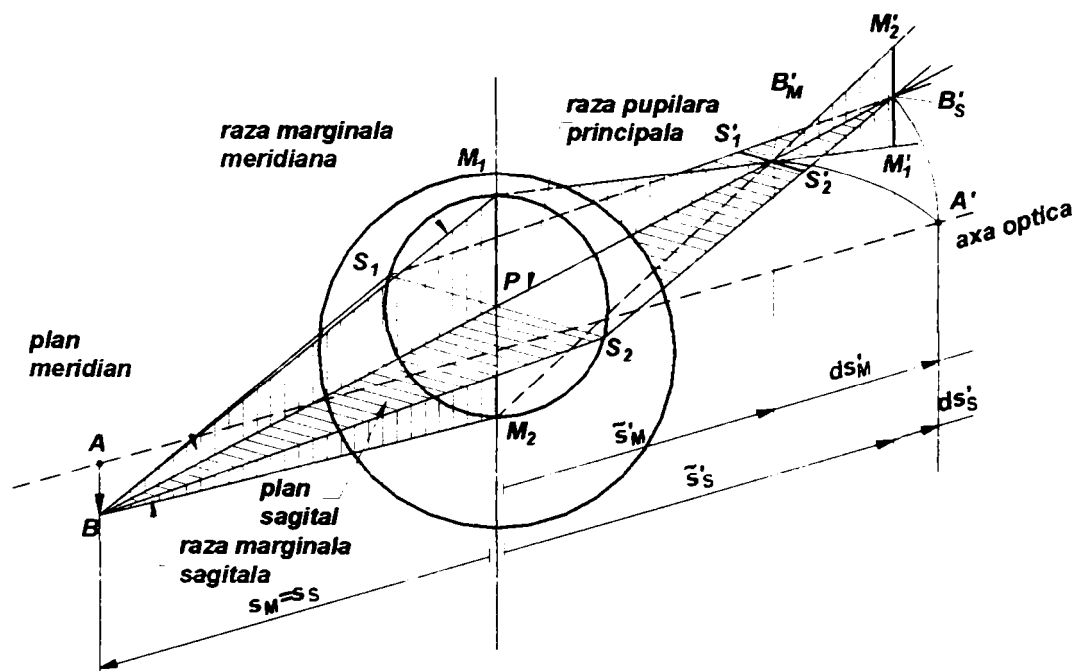


Fig. 2.6. Manifestarea aberației de astigmatism la formarea imaginii unui punct extraaxial de la care pomește un fascicul puternic înclinat

Astigmatismul se manifestă prin neclaritatea imaginii și are efecte minime într-o secțiune situată între liniile de focar, într-o zonă de difuzie minimă.

Dacă se construiește imaginea tuturor punctelor obiectului AB se constată că se obțin două imagini separate, corespunzătoare planelor tangențial și sagital, de formă neliniară și având curburi diferite (arcele $A'B'_M$ și $A'B'_S$ în figura 2.6).

Astigmatismul se consideră corectat dacă se realizează suprapunerea suprafețelor imagine curbe tangențială și sagitală. Curbura suprafeței imagine, în absența astigmatismului, reprezintă un alt tip de aberație geometrică numită curbura de câmp. Suprafața curbă imagine poartă numele de suprafață Petzval. Spre deosebire de aceasta, care are formă sferică, suprafețele tangențială și sagitală generate de astigmatismul primar au formă de paraboloid. Suprafața tangențială se află la o distanță de trei ori mai mare decât cea sagitală (fig.2.7).

Pentru punctele axiale astigmatismul nu se manifestă. În cazul punctelor extraaxiale este cu atât mai accentuat cu cât depărtarea acestora față de axa optică este mai mare. Mărimea aberației de astigmatism depinde de puterea și forma lentilei, dar și de poziția și deschiderea diafragmei de apertură care determină pupila de intrare.

Pentru o lentilă singulară astigmatismul este numeric aproximativ egal cu raportul y^2/f' .

Din figura 2.12 se observă că suprafețele imagine tangențială și sagitală se găsesc de aceeași parte a suprafeței Petzval, ceea ce constituie o regulă generală. Considerând suprafața Petzval ca referință, dacă suprafețele astigmatice sunt curbate spre sistemul optic (ca în figura 2.7) astigmatismul se numește negativ sau subcorectat. În caz contrar, este pozitiv sau supracorectat (cele două suprafețe astigmatice au curburile inverse celor din figura 2.7).

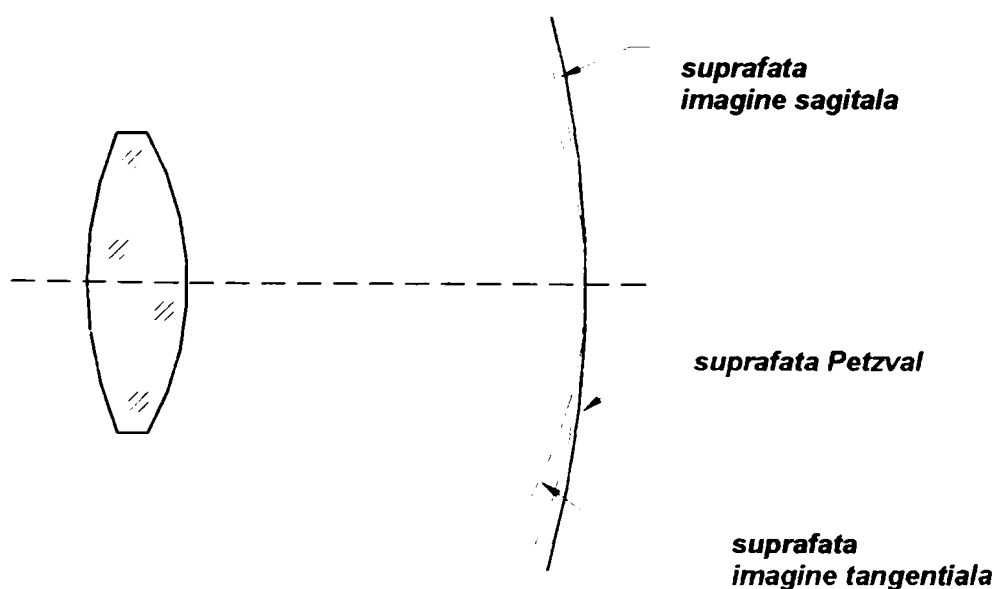


Fig.2.7. Suprafața Petzval și suprafețele imagine tangențială și sagitală

Curbura de câmp poate fi, de asemenea, pozitivă sau negativă, după cum centrul său

de curbură se află între lentilă și suprafață, respectiv după aceasta. Curbura de câmp are numai o măsură axială sau longitudinală și reprezintă distanța dintre suprafața imagine de referință plană și suprafața Petzval. Pentru o lentilă singulară curbura de câmp este aproximativ $y'^2/2nf'$.

Astigmatismul se apreciază prin curburile de câmp astigmatice tangențială z_t și sagitală z_s , determinate pentru diverse înclinări ale razei pupilare principale (pornind de la mai multe puncte de pe înălțimea obiectului). Mărimile z_t și z_s exprimă de fapt diferențele dintre proiecțiile pe axa optică a razelor tangențială și sagitală infinit apropiate razei pupilare principale și distanța imagine determinată de raza pupilară principală, raportată la axa optică. Aceste diferențe sunt asimilate cu distanțele de la punctele imagine astigmatice la suprafața imagine ideală plană, perpendiculară pe axa optică într-un punct corespunzător abscisei imagine meridiane date de raza pupilară principală.

Toleranțele pentru curburile astigmatice de câmp sunt date de toleranța la adâncimea focarului. În majoritatea aplicațiilor această precizie nu este atinsă, aberațiile reale fiind mult mai mari decât cele prescrise din criteriul ondulatoriu Rayleigh $\lambda/4$.

2.2.4.4. Distorsiunea

Distorsiunea este o aberație geometrică determinată de faptul că poziția imaginii punctelor extraaxiale, măsurată pe axa y diferă de poziția imaginii ideale, paraxiale. Distorsiunea se poate exprima fie prin diferența dintre înălțimea reală \tilde{y}' a imaginii extraaxiale și înălțimea de referință paraxială a imaginii y' :

$$dy' = \tilde{y}' - y', \quad (2.13)$$

fie procentual – adimensional – cu raportare la înălțimea imaginii paraxiale:

$$dy'_{\%} = \frac{\tilde{y}' - y'}{y'} \cdot 100. \quad (2.14)$$

Aberația poate fi interpretată ca o variație a măririi transversale cu înălțimea obiectului. Această variație are ca efect formarea unor imagini care nu sunt asemenea cu obiectele.

Distorsiunea poate fi pozitivă sau negativă, după cum imaginea punctului extraaxial se formează mai aproape, respectiv mai departe de axa optică în raport cu punctul imagine de referință.

În figura 2.8 este reprezentată imaginea unui obiect de formă pătrată. Imaginea ideală, trasată cu linie întreruptă este asemenea cu obiectul. Pe imaginea reală, laturile rectilinii ale pătratului, datorită variației măririi liniare cu depărtarea de axa optică, sunt linii curbe. Sistemul optic poate introduce un efect de curbare spre exterior, cu distorsiune pozitivă (fig.2.8.a) sau de curbare spre interior, cu distorsiune negativă (fig.2.8.b). Se poate

demonstra că distorsiunea este proporțională cu cubul înălțimii obiectului (iar distorsiunea procentuală cu pătratul acesteia). Din această observație rezultă că punctele din colțurile pătratului sunt afectate de o distorsiune de $2\sqrt{2}$ ori mai mare decât punctele de la mijlocul laturilor, ceea ce explică forma imaginii și descrie, cel puțin calitativ curbunile.

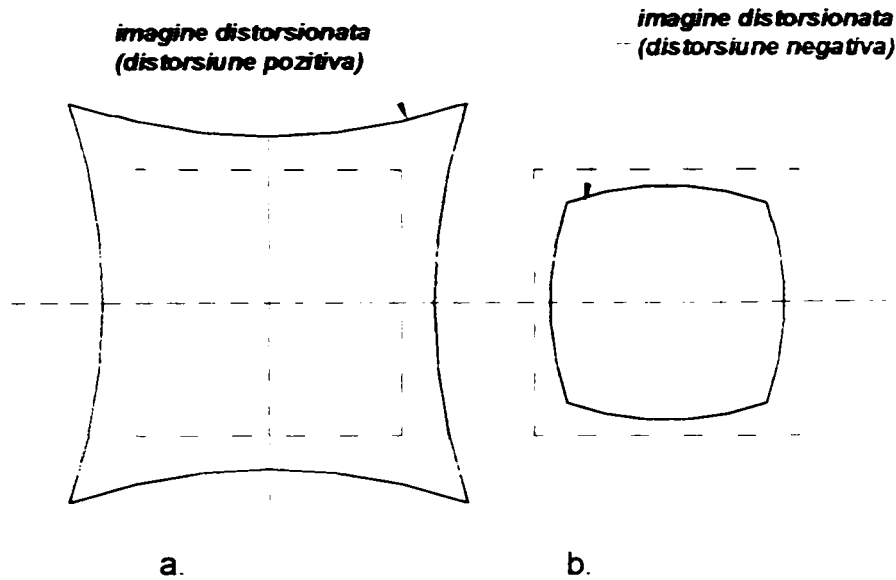


Fig.2.8. Imagini distorsionate pozitiv (a) și negativ (b) ale unui obiect de formă pătrată

Calculul distorsiunii presupune trasarea meridiană a razei pupilare principale, pentru determinarea înălțimii \tilde{y}'_p și trasarea paraxială a unei raze obiective și a razei pupilare principale, pentru calculul înălțimii de referință y' .

2.2.5. Aberații cromatice

Aberațiile cromatice sunt determinate de policromatismul luminii albe în care lucrează majoritatea aparatelor optice. Aceste erori de formare a imaginii însoțesc aberațiile geometrice, dar nu depind de acestea și se manifestă chiar și în domeniul paraxial.

Aberațiile cromatice apar ca urmare a manifestării fenomenului de dispersie. Dispersia materialelor optice în domeniul vizibil – numită dispersie normală - este monoton descrescătoare dar neliniară de la albastru spre roșu și, ca urmare, nu poate fi caracterizată printr-un singur parametru.

Indicatorii de dispersie utilizați în proiectarea componentelor optice sunt:

- ◆ dispersia medie (principală):

$$\Delta n = n_F - n_C \text{ sau } \Delta n = n_F - n_C \quad (2.15)$$

- ◆ numărul Abbe:

$$v_e = \frac{n_e - 1}{n_F - n_C}; v_D = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}; v_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (2.16)$$

- ◆ dispersii parțiale:

$$n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}, \quad (2.17)$$

- ◆ dispersii parțiale relative:

$$g_{\lambda} = \frac{n_{F'} - n_{\lambda}}{n_{F'} - n_{C'}}. \quad (2.18)$$

Indicii Fraunhofer e, F', C' corespund liniilor spectrale cu lungimea de undă 546.074 nm (din spectrul Hg), 479.992 nm (din spectrul Cd) și respectiv 643.850 nm (din spectrul Cd), care definesc radiații de culoare verde – considerată de referință - , albastră și respectiv roșie. Radiațiile e, F' și C' reprezintă liniile de referință, respectiv de delimitare a domeniului vizibil de calcul.

Aberația cromatică de poziție (longitudinală sau axială) determină formarea imaginii unui punct obiect axial sau poziția focarului în locuri distincte pe axa optică pentru lungimi de undă diferite (fig.2.9).

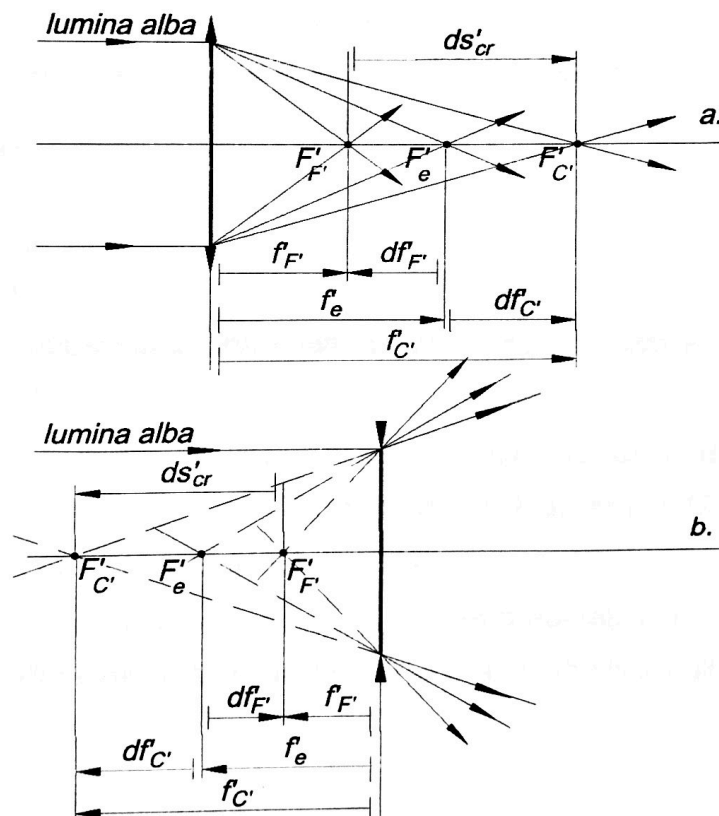


Fig.2.9. Aberația cromatică pentru lentila convergentă (a) și divergentă (b)

Eliminarea cromatismului presupune egalitatea absciselor imagine pentru toate lungimile de undă și pentru orice înălțime de incidență, ceea ce, practic, este imposibil. În proiectarea sistemelor optice, în mod curent, se urmărește suprapunerea a două sau trei abscise imagine (pentru două sau trei lungimi de undă), ceea ce se dovedește suficient

pentru o bună calitate a imaginii.

Determinarea aberației cromatice axiale presupune calculul aberației cromatice paraxiale și al aberației cromatice extraaxiale.

Aberația cromatică axială paraxială, pentru domeniul vizibil, este reprezentată de diferența absciselor imagine paraxiale pentru liniile de la marginea domeniului:

$$ds'_{cr} = s'_F - s'_C \quad (2.19)$$

Aberația cromatică axială extraaxială se exprimă ca diferență a absciselor imagine extraaxiale de la marginile spectrului vizibil, la diverse înălțimi de incidență:

$$d\tilde{s}'_{cr} = \tilde{s}'_F - \tilde{s}'_C \quad (2.20)$$

Cu ajutorul punctelor determinate cu relația (2.19) și (2.20) se trasează o curbă de variație a aberației cromatice cu apertura.

Având în vedere faptul că aberația cromatică este influențată de înălțimea de incidență, variația sa poate fi privită ca o aberație sferică în dependență de lungimea de undă. Cele două aberații, sferică și cromatică se analizează de obicei împreună, cu denumirea de sferocromatism. Curbele care definesc sferocromatismul au expresiile:

$$ds'_e = \tilde{s}'_e - s'_e \quad (2.21)$$

$$ds'_{F'} = \tilde{s}'_{F'} - s'_e \quad (2.22)$$

$$ds'_{C'} = \tilde{s}'_{C'} - s'_e \quad (2.23)$$

și au ca variabilă independentă înălțimea de incidență h . Curbele exprimă o variație cromatică a aberației sferice.

O altă formă a sferocromatismului este exprimarea aberației cromatice pentru anumite aperturi precizate (în general, înălțimea maximă de incidență, zona și paraxialul) având ca variabilă independentă lungimea de undă).

Se definesc și forme transversale de exprimare a aberației cromatice, prin diferența dintre înălțimile imaginilor paraxiale, respectiv extraaxiale pentru liniile albastră și roșie:

$$dy'_{cr} = y'_{F'} - y'_{C'} = ds'_{cr} \sigma' \quad (2.24)$$

$$d\tilde{y}'_{cr} = \tilde{y}'_{F'} - \tilde{y}'_{C'} \text{tg}\tilde{\sigma}' \quad (2.25)$$

unde σ' și $\tilde{\sigma}'$ reprezintă unghiul dintre axa optică și raza emergentă paraxială, respectiv extraaxială pentru linia de referință de la mijlocul spectrului.

Toate expresiile aberației cromatice descrise anterior se bazează pe date obținute prin trasări paraxiale și trigonometrice ale razelor obiective.

Dacă se trasează raza pupilară principală se pot obține încă doi indicatori transversali de caracterizare a cromatismului:

- aberația cromatică laterală paraxială:

$$dy'_{crp} = y'_{pF} - y'_{pC}, \quad (2.26)$$

- aberația cromatică laterală extraaxială:

$$d\tilde{y}'_{crp} = \tilde{y}'_{pF} - \tilde{y}'_{pC}. \quad (2.27)$$

Toleranțele pentru aberația cromatică după criteriul Rayleigh $\lambda/4$ sunt de forma:

$$d\tilde{s}'_{cr} = \pm \frac{\lambda}{n' \sin^2 \tilde{\sigma}'}, \quad (2.28)$$

$$d\tilde{y}'_{cr} = \pm \frac{\lambda}{n' \sin \tilde{\sigma}'}, \quad (2.29)$$

$$d\tilde{y}'_{crp} = \pm \frac{0.5\lambda}{n' \sin \tilde{\sigma}'}. \quad (2.30)$$

Aceste toleranțe sunt mai puțin semnificative decât în cazul aberațiilor geometrice monocromatice. Încadrarea în intervalele prescrise indică respectarea criteriului pentru liniile extreme ale spectrului vizibil, pentru lungimile de undă intermediare diferența de drum optic fiind mai mică sau mult mai mică decât $\lambda/4$. Având în vedere sensibilitatea spectrală a ochiului, cu maxim la mijlocul spectrului, în aplicațiile curente se poate admite o majorare a valorilor date de relațiile (2.28-2.30) cu un factor de [1.8...2.5].

2.2.6. Criterii ondulatorii de evaluare a calității imaginii

Diferența de drum optic OPD, definită ca distanță între frontul de undă real și cel sferic de referință și măsurată în lungimi de undă, reprezintă o măsură a aberației de undă în cazul fronturilor de undă netede, cu geometrie monotonă, fără neregularități locale. Pentru fronturi de undă puternic deformate local, o mai bună măsură a erorilor este rădăcina medie pătratică a OPD, determinată pe întreaga apertură. Între OPD și rădăcina medie pătratică a OPD (simbolizată RMS OPD), pentru fronturi de undă reale netede există relația aproximativă:

$$\text{RMS OPD} = \frac{\text{OPD}}{3.5}. \quad (2.31)$$

Pentru fronturi de undă reale neregulate, așa cum rezultă în cazul componentelor cu erori de fabricație, numitorul relației (2.31) este mai mare, cu valori cuprinse între 4 și 5, astfel încât criteriul Rayleigh $\lambda/4$ aplicat RMS OPD corespunde unei diferențe de drum admise de $\lambda/14 \dots \lambda/20$.

Un alt criteriu de apreciere a calității imaginii referitor la distribuția energiei în pata de difuzie imagine este Raportul Strehl, care reprezintă iluminarea discului Airy pentru sistemul optic cu aberații, exprimată ca fracțiune din iluminarea corespunzătoare unui sistem optic perfect.

Un Raport Strehl de 80% este echivalent cu OPD $\lambda/4$. În general se poate scrie relația de corespondență:

$$\text{Raport Strehl} = e^{-(2\pi\omega)^2}, \quad (2.32)$$

unde ω = RMS OPD, exprimat în lungimi de undă.

Tabelul 2.2 prezintă relațiile între criteriile de calitate a imaginii bazate pe OPD. CU notația RL s-a simbolizat criteriul Rayleigh.

Tabelul 2.2

OPD	RMS OPD	Raport Strehl	Energie [%]	
			Disc Airy	Inele
0.0	0.0	1.00	84	16
0.25 RL= $\lambda/16$	0.018 λ	0.99	83	17
0.5 RL= $\lambda/8$	0.036 λ	0.95	80	20
1.0 RL= $\lambda/4$	0.07 λ	0.80	68	32
2.0 RL= $\lambda/2$	0.14 λ	0.40	40	60
3.0 RL=0.75 λ	0.21 λ	0.10	20	80
4.0 RL= λ	0.29 λ	0.00	10	90

Valorile mici ale Raportului Strehl nu mai descriu corect calitatea imaginii, astfel încât sunt de preferat alte criterii în aceste cazuri.

2.2.7. Diagrama spot

Diagrama spot reprezintă o metodă geometrică de evaluare a distribuției de energie în planul imagine. Principial, fasciculul incident pe pupila de intrare a unui sistem optic este discretizat printr-un număr mare de raze, ale căror puncte de incidență sunt uniform distribuite pe suprafața pupilei. Fiecărei raze îi corespunde o mică arie din suprafața pupilei, iluminarea acesteia fiind egal distribuită pe ariile elementare. Trasând razele prin sistemul optic și intersectând fasciculul emergent cu planul imagine se obține o figură plană alcătuită din puncte corepunzătoare razelor. Împrăștierea punctelor semnalează prezența aberațiilor sistemului analizat și este invers proporțională cu iluminarea zonei pe care o ocupă. Punctele echidistante de pe suprafața pupilei de intrare se vor găsi în planul imaginii cu o densitate de suprafață diferită și variabilă, care indică de fapt distribuția energiei în imaginea punctului.

Trasarea razelor din conul luminos incident se realizează cu ajutorul drumurii vectoriale, care permite modelarea matematică tridimensională a razelor.

Diagrama spot, în general, reprezintă un indicator sintetic și sugestiv al aberațiilor sistemului analizat. Fără a parcurge calculul analitic laborios și defalcat pe fiecare tip de aberație, trasarea diagramei spot permite o evaluare imediată a prezenței aberațiilor care conduc la forme caracteristice ale petei de împrăștiere a punctelor imagine. Astfel, aberația sferică este indicată printr-o pată circulară, cu diametru mare și densitate de puncte

descrescătoare de la centru spre periferie; coma determină o formă asimetrică, specifică aberației, cu evidențierea nucleului și cozii cometei prin densitate mare, respectiv redusă a punctelor; astigmatismul introduce asimetrie în raport cu axa y a petei imagine. Aceste aspecte conferă diagramei spot un caracter de indicator prin excelență calitativ. Totuși, prin prelucrări ulterioare, diagrama spot poate fi utilizată pentru determinarea unor indicatori difracționali de calitate a imaginii, derivați din teoria opticii Fourier, care definește conceptele și demonstrează relațiile caracteristice funcției optice de transfer.

2.3. METODE DE ANALIZĂ A CALITĂȚII IMAGINII

2.3.1. Trasarea razelor în domeniul paraxial

Analiza calității imaginii include algoritmi necesari determinării caracteristicilor de referință ale sistemului și indicatorilor de calitate a imaginii.

Relațiile din dioptrica de ordinul I, caracteristice domeniului paraxial, se utilizează pentru definirea punctelor cardinale ale componentelor și sistemelor optice (focare, puncte principale și antiprinicipale etc.) și în calculele primare de gabarit.

Ecuțiile de formare a imaginii și expresiile măririlor dioptrului se bazează pe invariantul paraxial (invariantul Abbe) exprimat sub una dintre formele:

$$Q_s \equiv n \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{s} \right) = n' \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{s'} \right). \quad (2.33)$$

$$A_s \equiv n \left(\frac{h}{r} - \sigma \right) = n' \left(\frac{h}{r} - \sigma' \right) \quad (2.34)$$

și invariantul Helmholtz-Lagrange:

$$\frac{ny}{s} = \frac{n'y'}{s'} = L. \quad (2.35)$$

$$ny\sigma = n'y'\sigma' = H. \quad (2.36)$$

Funcție de forma particulară a dioptrului, ecuația de formare a imaginii, are una dintre expresiile:

- Suprafață sferică refractantă

$$s' = \frac{n'}{\frac{n}{s} + \frac{n'-n}{r}}, \quad (2.37)$$

- Suprafață sferică reflectantă

$$s' = \frac{rs}{2s - r}, \quad (2.38)$$

- Suprafață plană refractantă

$$s' = \frac{n'}{n} s, \quad (2.39)$$

- Suprafață plană reflectantă

$$s' = -s. \quad (2.40)$$

Într-un sistem optic centrat, trecerea de la un dioptru la următorul se face cu relația

$$s_+ = s' - d, \quad (2.41)$$

unde s_+ simbolizează abscisa obiect a dioptrului următor, iar d – distanța dintre dioptri.

Trasarea paraxială a razelor cu abscise infinite permite determinarea distanțelor focale, principalele caracteristici optice a dioptrilor și respectiv a sistemelor optice.

În cazul general al dioptrului sferic refractant, distanțele focale imagine, respectiv obiect au expresiile:

$$f' = \frac{n'r}{n'-n}. \quad (2.42)$$

$$\bar{f} = -\frac{nr}{n'-n}. \quad (2.43)$$

Cazuri particulare se obțin prin introducerea unor condiții specifice în relațiile (2.42) și (2.43):

- Dioptru plan refractant ($r = \infty$):

$$f' = -\bar{f} = \infty. \quad (2.44)$$

- Dioptru sferic reflectant ($n' = -n$):

$$f' = \bar{f} = \frac{r}{2}. \quad (2.45)$$

- Dioptru plan reflectant ($n' = -n, r = \infty$):

$$f' = \bar{f} = \infty. \quad (2.46)$$

Distanțele focale determină puterea optică a dioptrilor, a componentelor sau a sistemelor optice:

$$\Phi = \frac{1}{f'} [\text{dpt.}] \text{ dacă } \langle f' \rangle = [\text{m}]. \quad (2.47)$$

sau
$$\Phi = \frac{1000}{f'} [\text{dpt.}] \text{ dacă } \langle f' \rangle = [\text{mm}] \quad (2.48)$$

În cazul unui sistem centrat, format din k dioptri, distanțele focale imagine și obiect se determină cu relațiile:

$$f' = s_1 \frac{s_2' s_3' \dots s_k'}{s_2 s_3 \dots s_k} = s_1 \prod_{j=2}^k \frac{s_j'}{s_j} \quad \wedge \quad s_1 = \infty. \quad (2.49)$$

$$\bar{f} = \frac{h_1 h_2 \dots h_k}{\sigma_1 h_1 h_{k-1}} = \frac{s_1 \sigma_1 s_2 s_3 \dots s_k}{\sigma_1 s_1 s_2 s_{k-1}} = s_k \prod_{j=1}^{k-1} \frac{s_j}{s'_j} \wedge s'_k = \infty, \quad (2.50)$$

Trasarea paraxială a razelor permite și determinarea măririlor obiective ale dioptrului și, respectiv, sistemelor optice, după cum urmează:

□ Mărirea transversală (sau liniară)

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{n s'}{n' s} = -\frac{\bar{f}}{z} = -\frac{z'}{f'}. \quad (2.51)$$

$$\beta = \frac{s'_1 s'_2 \dots s'_k n_1}{s_1 s_2 \dots s_k n_k} = \frac{n_1}{n_k} \prod_{j=1}^k \frac{s_j}{s'_j}. \quad (2.52)$$

□ Mărirea unghiulară

$$\gamma = \frac{\sigma'}{\sigma} = \frac{s}{s'} = \frac{\bar{f}}{z'} = \frac{z}{f'}. \quad (2.53)$$

$$\gamma = \frac{\sigma'_k}{\sigma_1} = \frac{\sigma'_1 \sigma'_2 \dots \sigma'_k}{\sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_k} = \gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_k = \prod_{j=1}^k \gamma_j = \frac{s_1 s_2 \dots s_k}{s'_1 s'_2 \dots s'_k} = \prod_{j=1}^k \frac{s_j}{s'_j} \quad (2.54)$$

□ Mărirea longitudinală

$$\alpha = \frac{dz'}{dz} = -\frac{z'}{z} = \frac{n s'^2}{n' s^2}. \quad (2.55)$$

$$\alpha = \prod_{j=1}^k \alpha_j = \left(\frac{s'_1 s'_2 \dots s'_k}{s_1 s_2 \dots s_k} \right)^2 \frac{n_1}{n_k} = \frac{n_1}{n_k} \prod_{j=1}^k \left(\frac{s'_j}{s_j} \right)^2 \quad (2.56)$$

Dioptrica de ordinul I poate pune în evidență și punctele și planele cardinale ale sistemelor optice. Punctele cardinale (fig.2.10) sunt perechi de puncte conjugate pe axa optică, pentru care măririle au valori unitare:

$$\beta = \pm 1, \quad \gamma = \pm 1. \quad (2.57)$$

Se definesc:

□ Puncte și plane principale (caracterizate prin mărime liniară egală cu +1)

$$-\frac{\bar{f}}{z_H} = +1 \Rightarrow z_H = -\bar{f}, \quad -\frac{z_{H'}}{f'} = +1 \Rightarrow z_{H'} = -f', \quad (2.58)$$

□ Puncte și plane antiprinipale (caracterizate prin mărime liniară egală cu -1)

$$-\frac{\bar{f}}{z_{AH}} = -1 \Rightarrow z_{AH} = \bar{f}, \quad -\frac{z_{AH'}}{f'} = -1 \Rightarrow z_{AH'} = f' \quad (2.59)$$

□ Puncte și plane nodale (caracterizate prin mărime unghiulară egală cu +1)

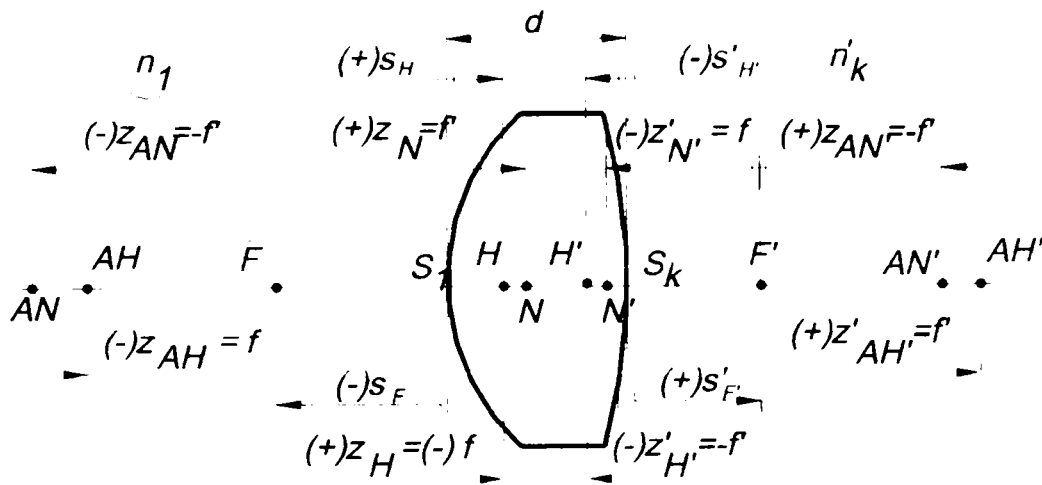


Fig.2.10. Puncte și plane cardinale

$$\frac{\bar{f}}{z_N} = +1 \Rightarrow z_N = \bar{f}, \quad \frac{z_N}{f'} = +1 \Rightarrow z_N = f'. \quad (2.60)$$

□ Puncte și plane antinodale (caracterizate prin mărirea unghiulară egală cu -1)

$$\frac{\bar{f}}{z_{AN}} = -1 \Rightarrow z_{AN} = -\bar{f}, \quad \frac{z_{AN}}{f'} = -1 \Rightarrow z_{AN} = -f'. \quad (2.61)$$

În cazul particular al sistemelor optice situate în aer, distanțele focale sunt egale în modul, astfel încât punctele nodale se suprapun peste cele principale, iar cele antinodale peste cele antiprinicipale. În figura 2.10 este reprezentat cazul general în care mediul obiect și mediul imagine au indici de refracție diferiți.

Abscisele punctelor, respectiv planelor principale pot fi determinate și în raport cu vârful primului, respectiv ultimului dioptru, după trasarea razelor prin sistem, cu ajutorul relațiilor:

$$s'_{H'} = s'_{F'} - f', \quad (2.62)$$

$$s_H = s_F - \bar{f}. \quad (2.63)$$

2.3.2. Trasarea razelor în domeniul extraaxial

Determinarea coordonatelor reale ale punctelor imagine necesită aplicarea uneia dintre următoarele metode de trasare a razelor:

- Trasarea razelor în plan meridian (metoda trigonometrică)
- Trasarea oblică a razelor (ecuațiile Coddington)
- Trasarea vectorială a razelor.

Trasarea razelor în plan meridian are la bază raționamente geometrice și legea refracției. Elementele implicate în metodă sunt puse în evidență în figura 2.11. Drumuirea se

realizează parcurgând patru pași pentru fiecare dioptru:

$$\sin \tilde{\varepsilon} = -\frac{(\tilde{s} - r)\sin \tilde{\sigma}}{r}, \tag{2.64}$$

$$\sin \tilde{\varepsilon}' = \frac{n}{n'} \sin \tilde{\varepsilon}. \tag{2.65}$$

$$\tilde{\sigma}' = \tilde{\sigma} - \tilde{\varepsilon} + \tilde{\varepsilon}'. \tag{2.66}$$

$$\tilde{s}' = r \left(1 - \frac{\sin \tilde{\varepsilon}'}{\sin \tilde{\sigma}'} \right). \tag{2.67}$$

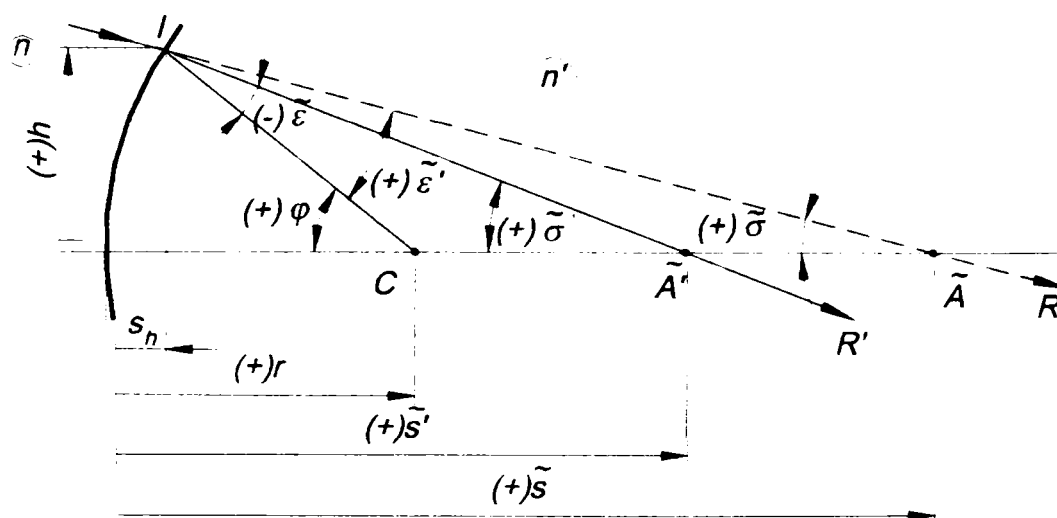


Fig.2.11. Refracția pe un dioptru sferic

Trecerea la dioptrul următor, se face după relațiile care rezultă conform figurii 2.12.

$$\tilde{s}_+ = \tilde{s}' - d, \quad \tilde{\sigma}_{j+1} = \tilde{\sigma}'. \tag{2.68}$$

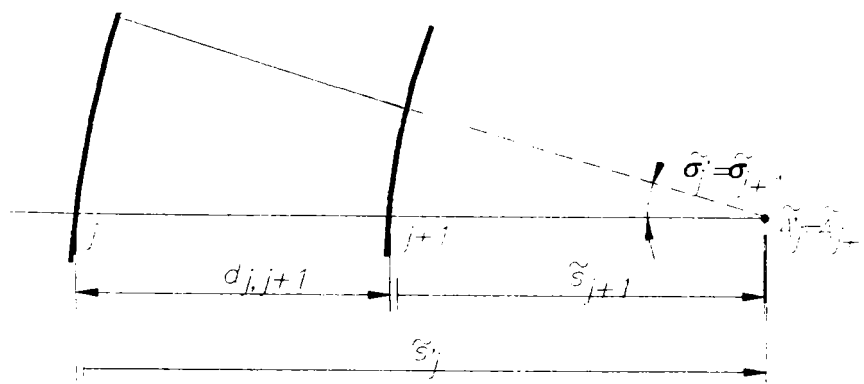


Fig.2.12. Trecerea de la un dioptru la dioptrul următor

Trasarea obică a razelor în plan tangențial și sagital este echivalentă cu trasarea paraxială a razelor în cele două plane, având ca referință raza pupilară principală care pomește de la punctul obiect extraaxial și trece prin centrul pupilei de intrare a sistemului

optic. Aceste drumuri specifice necesită rezultatele trasării trigonometrice a razei obiective și a razei pupilare principale. Cu ajutorul acestora se aplică ecuațiile Coddington, care, de fapt determină lungimile reale ale razelor în spațiul obiect și imagine în cele două plane, tangențial și sagital, raportate la raza pupilară principală. Rezultatele drumurii oblice sunt utilizate în scopul determinării curbunilor astigmatice de câmp în cele două plane.

Presupunând realizate trasările trigonometrice ale razei obiective și pupilare principale se pot aplica Ecuațiile Coddington după cum urmează:

- determinarea datelor intermediare necesare drumurii oblice:

$$\Phi = c(n' \cos \tilde{i}' - n \cos \tilde{i}), \quad (2.69)$$

$$z = \frac{1 - \cos(\tilde{i}'_p - \tilde{\sigma}_p)}{c_1}, \quad (2.70)$$

$$\tilde{d} = \frac{d - z + z_-}{\cos \tilde{\sigma}'}, \quad (2.71)$$

- determinarea lungimilor razelor tangențiale obiect și imagine în plan tangențial:

$$t = \frac{\tilde{s}_p - z}{\cos \tilde{\sigma}_p}, \quad (2.72)$$

$$\frac{n' \cos^2 \tilde{i}'}{t'} = \frac{n \cos^2 \tilde{i}}{t} + \Phi \Rightarrow t', \quad (2.73)$$

- determinarea lungimilor razelor tangențiale obiect și imagine în plan sagital:

$$s = \frac{\tilde{s}_p - z}{\cos \tilde{\sigma}_p}, \quad (2.74)$$

$$\frac{n'}{s'} = \frac{n}{s} + \Phi \Rightarrow s'. \quad (2.75)$$

În relațiile anterioare s-au utilizat următoarele notații: Φ - puterea dioptrului, c - curbura ($1/r$), z - abscisa punctului de incidență a razei pe dioptru, \tilde{d} - lungimea geometrică parcursă de rază între doi dioptri consecutivi între care distanța măsurată pe axa optică este d , t - lungimea razei incidente în plan tangențial, t' - lungimea razei emergente în plan tangențial, s - lungimea razei incidente în plan sagital, s' - lungimea razei emergente în plan sagital.

Trasarea vectorială a razelor permite modelarea matematică tridimensională a oricărei raze din conul luminos care pomește de la un punct obiect.

Discretizarea pupilei de intrare se poate face după un caroiaj ortogonal (fig.2.13.a) sau polar (fig.2.13.b), în nodurile căruia sunt incidente razele obiective.

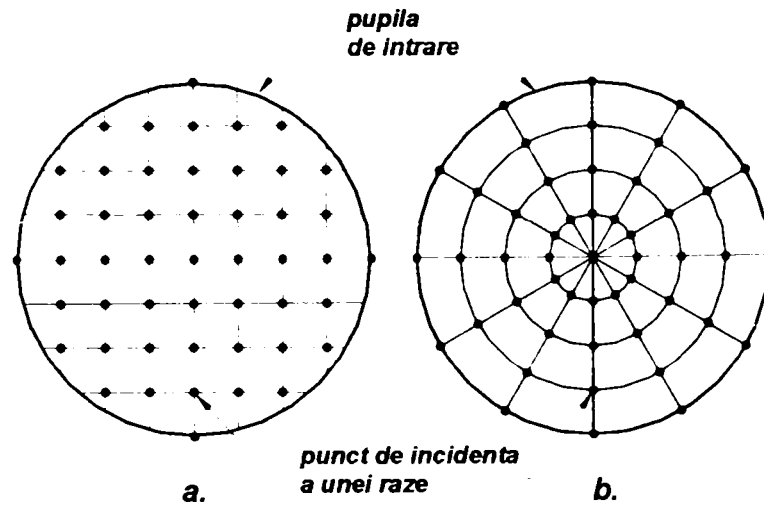


Fig. 2.13. Discretizare ortogonală (a) și polară (b) a pupilei de intrare

Se consideră un punct oarecare în spațiul obiect $A(x_A, y_A, z_A)$ de la care pornește o rază spre punctul $P(x_P, y_P, z_P)$ din planul pupilei de intrare (fig. 2.14).

Pentru trasarea vectorială a razei se parcurg etapele indicate în tabelul 2.3.

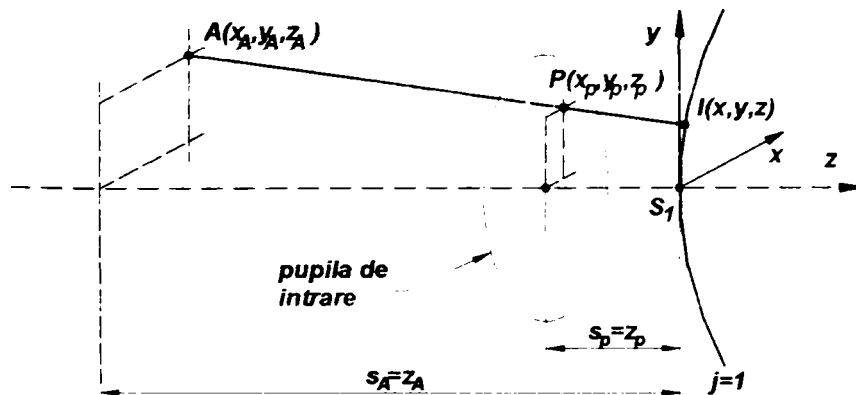


Fig. 2.14. Raza incidentă pornită din punctul obiect A, traversând pupila de intrare prin punctul P

Tabelul 2.3

Mărimă	Relația
Ecuatii de deschidere a drumurii (fig.2.14)	
Lungimea razei între punctul obiect și punctul din planul pupilei de intrare	$L = \sqrt{(x_A - x_P)^2 + (y_A - y_P)^2 + (z_A - z_P)^2}$ pentru $s_A = -\infty$ L nu se calculează
Cosinușii directori ai razei incidente	$\cos \alpha = \frac{x_P - x_A}{L}; \cos \beta = \frac{y_P - y_A}{L}; \cos \gamma = \frac{z_P - z_A}{L}$ pentru $s_A = -\infty$ $\cos \alpha = 0, \cos \beta = -\sin \sigma_P, \cos \gamma = \cos \sigma_P$ unde σ_P este unghiul dintre raza pupilară principală și axa optică

Lungimea razei incidente între punctul obiect și punctul de incidență pe primul dioptru	$D_1 = r_1 \left(F \pm \sqrt{F^2 - \frac{G}{r_1}} \right), \text{ unde } F = \cos \gamma - \frac{\cos \gamma (z_A - z_p) + \cos \beta y_A + \cos \alpha x_A}{r_1}$ $G = \frac{(z_A - z_p)^2 + y_A^2 + z_A^2}{r_1} - 2(z_A - z_p).$ Ecuația are două soluții. Convine soluția pozitivă sau cea mai mică dacă ambele sunt pozitive. Pentru $r_1 = \infty$ $D_1 = (z_1 - z_A) / \cos \gamma$. Pentru $s_A = -\infty$ se introduce un dioptru de calcul plan tangent la primul dioptru al sistemului, pe care practic nu are loc refracție ($n_0 = n_0' = 1$), dar care servește la determinarea coordonatelor celui de-al doilea punct necesar pentru calculul lungimii D_1 (fig.2.15)
---	---

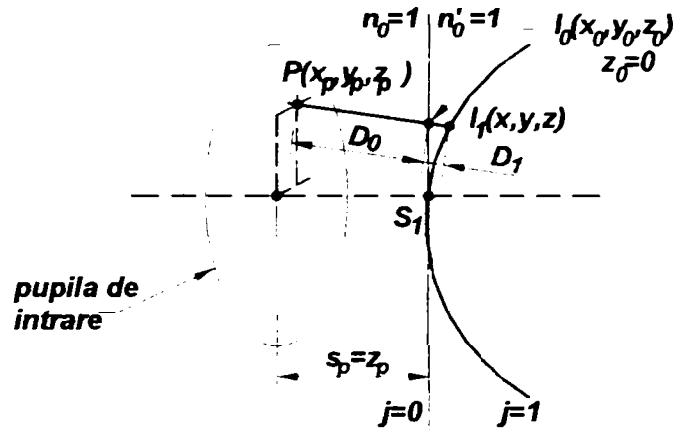


Fig.2.15. Introducerea unui plan de calcul tangent la primul dioptru pentru distanță obiect infinită

Coordonatele punctului de incidență pe primul dioptru	$x_1 = D_1 \cos \alpha + x_A; y_1 = D_1 \cos \beta + y_A; z_1 = D_1 \cos \gamma + z_A - z_p$
---	--

Ecuațiile drumirii pe dioptrii sistemului

Unghiul de incidență	$\cos i = F - \frac{D}{r}; \text{ pentru } r = \infty \cos i = \cos \gamma$
----------------------	---

Unghiul de emergență	$\cos i' = \sqrt{1 - \left(\frac{n}{n'}\right)^2 (1 - \cos^2 i)}$
----------------------	---

Cosinuzii directori ai razei emergente	$\cos' \alpha = \frac{1}{n'} \left(n \cos \alpha - x \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r} \right), \cos' \beta = \frac{1}{n'} \left(n \cos \beta - y \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r} \right),$ $\cos' \gamma = \frac{1}{n'} \left(n \cos \gamma - (z - r) \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r} \right), \text{ unde } x, y \text{ și } z \text{ sunt coordonatele punctului de incidență pe dioptrul de rază } r;$ <p>pentru $r = \infty$ $\cos' \alpha = \frac{n}{n'} \cos \alpha, \cos' \beta = \frac{n}{n'} \cos \beta, \cos' \gamma = \cos i'$.</p>
--	--

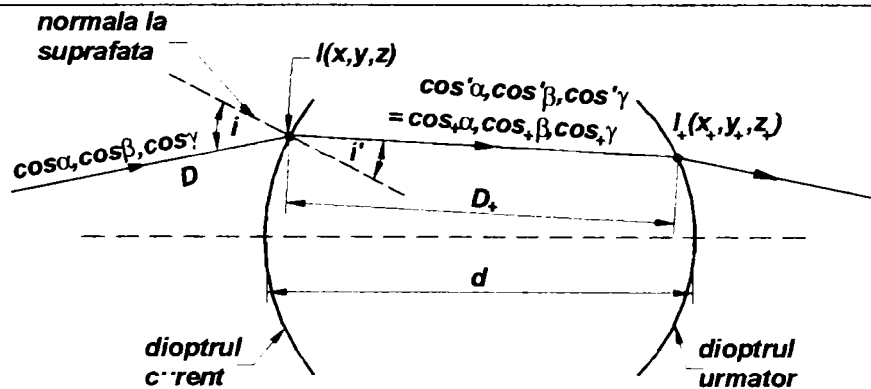


Fig.2.16. Elementele caracteristice dioptrului curent și transferul la dioptrul următor

Transferul la dioptrul următor (fig.2.16)	
Cosinușii directori ai razei incidente	$\cos \alpha_+ = \cos' \alpha, \cos \beta_+ = \cos' \beta, \cos \gamma_+ = \cos' \gamma.$
Lungimea razei între dioptri	$D_+ = r \left(F \pm \sqrt{F^2 - \frac{G}{r}} \right), \text{ unde } F = \cos \gamma - \frac{\cos \gamma (z - d) + \cos \beta y + \cos \alpha x}{r}$ $G = \frac{(z - d)^2 + y^2 + x^2}{r} - 2(z - d), \text{ unde } d \text{ este distanța dintre dioptri}$ <p>Ecuția are două soluții. Convine soluția pozitivă sau cea mai mică dacă ambele sunt pozitive ; pentru $r = \infty D_+ = (d - z) / \cos \gamma$</p>
Coordonatele punctului de incidență pe dioptrul următor	$x_+ = D_+ \cos \alpha_+ + x; y_+ = D_+ \cos \beta_+ + y; z_+ = D_+ \cos \gamma_+ + z - d$
Ecuțiile de închidere a drumurii	
Se introduce planul imagine la abscisa s' paraxială, față de care se calculează lungimea razei D.	

Drumuirea vectorială este utilizată pentru obținerea diagramei spot, care reprezintă un criteriu în sine de evaluare a calității imaginii sau poate fi prelucrată pentru calculul geometric al funcției de transfer de modulație.

2.3.3. Metode de analiză bazate pe optica Fourier

Funcția optică de transfer descrie capacitatea unui sistem optic de a transfera distribuția spațială a luminii din planul obiect în planul imagine.

Conceptul de funcție optică de transfer a apărut prin analogie cu funcția de transfer a sistemelor electronice, pentru care exista suportul matematic teoretic de descriere a răspunsului sistemului la acțiunea unui semnal de intrare impuls sau de formă sinusoidală. Prin analogie, sistemul optic răspunde la un impuls dreptunghiular - care modelează un obiect luminos punctiform - printr-o funcție de transfer numită funcția imagine a punctului sau PSF (point spread function) – sau la un semnal constituit de diverse frecvențe spațiale care pot fi asociate obiectelor luminoase extinse. În cazul acestora, sistemul optic se comportă ca un filtru spațial care permite transmiterea unor frecvențe anumite (detalii ale obiectului) în imagine, în timp ce restul frecvențelor vor fi tăiate de sistem.

Funcția optică de transfer, descrie, principial, efectele de difracție ale sistemului optic asupra frontului de undă incident. Analiza difracțională are sens pentru fronturi de undă care nu sunt puternic deformate din cauza aberațiilor geometrice și, cel puțin teoretic, este aplicată numai sistemelor optice limitate la difracție. Prin sistem optic limitat la difracție se înțelege un sistem optic care transformă o undă sferică provenită de la o sursă obiect punctiformă tot într-o undă sferică centrată într-un punct imagine. Sistemele optice reale prezintă într-o măsură mai mare sau mai mică întotdeauna aberații, ceea ce înseamnă că

pot primi atributul de limitat la difracție doar cu oarecare aproximație și, eventual, pe zone limitate ale câmpului obiect.

Analiza energetică a imaginii pune în evidență faptul că o importanță deosebită pentru caracteristicile acesteia o are și modul de iluminare a obiectului, care impune tratări matematice diferite ale problemelor. În principiu, omițând aspectul spectral, se pot identifica două moduri de iluminare a obiectelor: spațial incoerentă și spațial coerentă. Iluminarea spațial incoerentă caracterizează sursele extinse, la care oscilațiile provenite de la diversele puncte componente ale sursei au faze decalate aleator, statistic. Intensitatea luminoasă în planul imagine rezultă în fiecare punct prin însumarea intensităților provenite de la punctele sursei. Admițând acest principiu, sistemele optice iluminate incoerent sunt liniare în intensitate.

Iluminarea spațial coerentă (eventual o sursă laser) asigură în toate zonele obiectului oscilații luminoase cu diferențe de fază constante în timp. În acest caz se admite că în planul imagine se însumează amplitudinile oscilațiilor luminoase, sistemele fiind considerate liniare în amplitudine.

În principiu, în cazul sistemelor optice liniare – care la acțiunea unor stimuli simultani dă un răspuns egal cu suma răspunsurilor independente determinate de fiecare stimul – efectul componentelor optice și al diafragmenilor poate fi descris complet determinând imaginile surselor punctiforme care alcătuiesc câmpul obiect. Fiecărui punct i se asociază ca modelare matematică o funcție Dirac ($\delta(x, y) = \infty$, pentru $x = y = 0$ și $\delta(x, y) = 0$ pentru $\forall x, y \neq 0$), care are semnificația unui semnal foarte puternic și foarte îngust.

Funcția de răspuns a sistemului optic la un semnal Dirac se numește funcție imagine a punctului (PSF – point spread function [mm^{-2}]) și descrie distribuția normalizată a iluminării în imaginea punctului.

Obiectului luminos extins i se asociază funcția obiect $I_o(x, y)$, care descrie distribuția intensității luminoase în planul obiect, considerat iluminat incoerent, iar imaginii i se asociază funcția imagine $I_i(x, y)$, ca expresie a distribuției iluminării în planul imagine. Proprietatea de liniaritate a sistemului permite considerarea distribuției intensității luminoase în planul imagine ca sumă a efectelor fiecărui punct obiect. Răspunsul sistemului optic în cazul obiectelor extinse va depinde deci de funcția obiect și de răspunsul PSF. Din punct de vedere matematic funcția imagine este un produs de convoluție a funcției obiect și a PSF.

Transformata Fourier a funcției imagine a obiectului extins, iluminat incoerent, este egală cu produsul transformatei Fourier ale PSF și funcției obiect. Funcția optică de transfer (OTF – optical transfer function), este prin definiție, transformata Fourier a PSF și reprezintă răspunsul impulsional al sistemului optic.

OTF este o funcție complexă adimensională al cărei modul este unitar pentru

frecvența spațială nulă. $OTF(r,s)$ și $PSF(x,y)$ sunt două funcții care formează o pereche Fourier, se pot deduce reciproc, una din cealaltă, leagă spațiul real (x,y) de spațiul Fourier (r,s) și au spectre reciproce.

Modulul funcției optice de transfer se numește funcție de transfer de modulație, MTF (modulation transfer function), funcție adimensională și, în cazul particular, dar frecvent, al mirei sinusoidale cu frecvență constantă are semnificația raportului dintre modulația imaginii și modulația obiectului. Modulația, cu semnificația optică de contrast se definește funcție de valorile minimă și maximă ale unei mărimi radiometrice (intensitate, iluminare, strălucire):

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2.76)$$

Argumentul funcției optice de transfer se numește funcție de transfer de fază, PTF (phase transfer function) - funcție adimensională. PTF are valoarea nulă pentru frecvența spațială zero.

De interes este și distribuția iluminării în imaginea unei linii, LSF (line spread function [mm^{-1}]), care are semnificația distribuției normalizate a iluminării în imaginea unei surse liniare de radiație incoerentă. Din punct de vedere matematic LSF se exprimă ca produs de convoluție a răspunsului impulsional PSF și a unei drepte, aflate în regiunea izoplanatică (pentru aplicarea proprietăților de invarianță).

În practică, analiza Fourier bidimensională și policromatică este arareori utilizată, dat fiind că rezultate suficient de curpinzătoare se pot obține prin analize unidimensionale repetate pentru diverse orientări ale axei de referință (axa optică, raza pupilară principală la diverse deschideri ale câmpului obiect) și pentru câteva lungimi de undă monocromatice (de obicei, cele trei de referință, de la extremitățile și mijlocul spectrului de interes).

Ca urmare, majoritatea softurilor dedicate analizei sistemelor optice vor pune la dispoziția utilizatorului, sub formă numerică și grafică, funcția de transfer de modulație și de fază funcție de o frecvență spațială relativă la o singură direcție, precizată de utilizator, eventual un set de curbe, care să caracterizeze planul tangențial și sagital, în raport cu axa de referință impusă.

Un alt motiv pentru care relațiile generale deduse din optica ondulatorie și Fourier nu pot fi direct aplicate este acela că descrierea obiectului printr-o funcție analitică privind distribuția energetică spectrală este imposibil de scris, cu excepția unor obiecte de formă foarte simplă. Acest lucru, însă, nu reprezintă un impediment și chiar ar constitui un efort inutil, având în vedere faptul că funcția optică de transfer este o caracteristică a sistemului optic, independentă de forma, culoarea și contrastul obiectului și pentru a determina componentele sale (modulația și diferența de fază) poate fi utilizat, de fapt, orice fel de obiect. Standardele prevăd funcții obiect sinusoidale.

În tabelul 2.4 sunt redați sintetic parametri de calitate a imaginii obținuți din analiza difracțională și semnificația lor.

Tabelul 2.4

Parametru difracțional	Caracteristici descrise din planul imagine
MTF	Rezoluția, cu precizarea frecvenței de tăiere Iluminarea globală a imaginii
PTF	Contrastul (inversări de contrast), distorsiuni ale imaginii
PSF	Distribuția iluminării în imaginea punctului, strălucirea și claritatea imaginii extinse

PSF este o caracteristică numerică normată a fiecărui sistem optic. Valoric, PSF este egal cu raportul Strehl, care mai poate fi definit și în raport cu MTF :

$$\text{Strehl} = \frac{\iint \text{MTF}_{\text{sistem real}}}{\iint \text{MTF}_{\text{sistem limitat la difracție}}}, \quad (2.77)$$

Expresia (2.95) corespunde, de fapt, raportului dintre aria de sub curba MTF a sistemului cu aberații și aria de sub curba MTF a aceluiași sistem perfect. Dacă sistemul real este caracterizat printr-o aberație de undă OPD, se pot utiliza relațiile aproximative de legătură :

$$\text{Strehl} = e^{-(2\pi \text{RMS OPD})^2} \cong 1 - (2\pi \text{RMS OPD})^2, \quad (2.78)$$

unde RMS OPD este exprimat în lungimi de undă.

MTF și PTF se analizează, în general sub formă grafică. Ambii parametri au valorile normate maxime egale cu unitatea și se reprezintă în funcție de frecvența spațială pe o direcție dată (frecvența spațială poate fi normată în raport cu frecvența de tăiere sau rămâne exprimată în perechi de linii/mm).

În figura 2.17 este exemplificată o reprezentare MTF(r). Valoarea maximă a MTF corespunde frecvenței spațiale nule și scade până la zero pentru o frecvență spațială limită, numită de tăiere, care caracterizează capacitatea sistemului de a rezolva detalii, respectiv rezoluția acestuia.

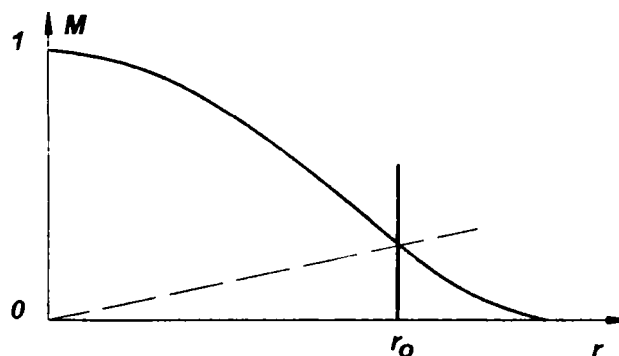


Fig.2.17. Curba de variație a MTF cu frecvența și limita de rezoluție impusă sistemului r_0 .
Suprafața de sub curbă este proporțională cu iluminarea imaginii

Limita de rezoluție sau frecvența de tăiere, r_{lim} , este de forma:

$$r_{lim} = \frac{2n' \sin \tilde{\sigma}'}{\lambda} = \frac{1}{\lambda(f'/D)}, \quad (2.79)$$

unde λ este măsurată în milimetri, iar f'/D este numărul de deschidere.

În mod practic, frecvența de tăiere nu reprezintă un criteriu de performanță în sine. Pentru fiecare aplicație, rezoluția sistemului optic este rațional să corespundă rezoluției receptorului de imagine.

Informativ, tabelul 2.5 redă rezoluțiile curente ale unor sisteme optice specifice și a receptorului natural.

Tabelul 2.5

Sistem	Rezoluție	
	Distanța între două puncte rezolvate [μm]	Frecvență spațială [perechi de linii/mm]
Fax	125	4
Ochiul uman	16 (pe retină)	≈ 31
Obiectiv f/8	2.5	200
Sistem asociat scannerului	1	500
Sistem asociat microlitografiei	0.5	1000

Considerând $r=r_0$ pragul de sensibilitate al receptorului, interesează porțiunea de curbă reprezentând modulația pe domeniul $r=[0\dots r_0]$. Suprafața cuprinsă între axele de coordonate, curba de modulație și dreapta prag de sensibilitate a receptorului, este, la o anumită scară, proporțională cu contrastul și, în final, luminozitatea globală a imaginii. Rezultă că este importantă de urmărit și forma curbei de modulație.

Funcția optică de transfer de modulație, în cazul semnalului sinusoidal unidirecțional este egală cu raportul modulațiilor imagine și obiect:

$$MTF(r) = \frac{M_i}{M_o} \quad (2.80)$$

și reprezintă o măsură aproape universală de caracterizare nu numai a sistemelor optice formate din lentile, ci și a filemlor, ochiului, a diverși receptori fizici.

În principiu, poate fi utilizată proprietatea de multiplicare a MTF a subansamblurilor care alcătuiesc un sistem mai complex, deși rezultatele pot, în general, să subestimeze caracteristicile ansamblului (pentru că, de exemplu, iluminarea este incoerentă numai pentru primul subansamblu sau lentilă și devine parțial coerentă pentru următoarele).

Partea imaginară a funcției optice de transfer - PTF – indică o deplasare a imaginii, concretizată prin distorsiune, de exemplu, dacă este liniară în frecvență. Neliniaritatea PTF poate avea și efecte vizibile în ceea ce privește distribuția energiei, în sensul că o defazare

de 180° este echivalentă cu inversarea contrastului (față de figura obiect, figura imagine are poziția benzilor luminoase și întunecate inversată).

Pentru iluminarea coerentă, MTF este o dreaptă orizontală, situată la nivelul unității, pentru un domeniu de frecvențe spațiale cuprinse între 0 și frecvența de tăiere r_0 (fig.2.35).

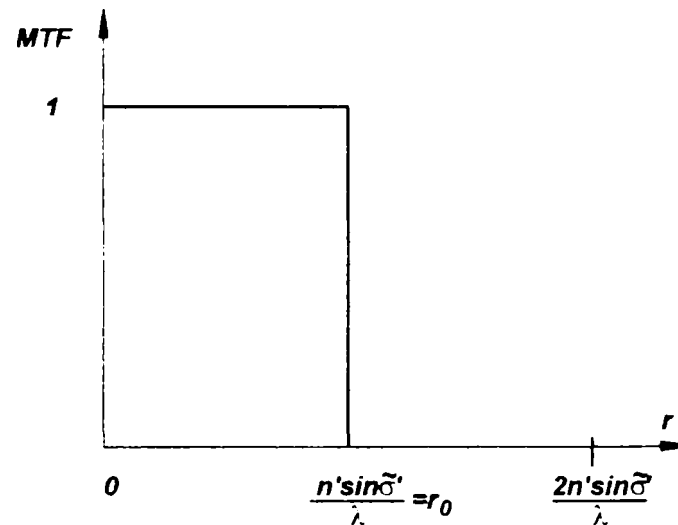


Fig.2.35. MTF în cazul iluminării coerente

Frecvența de tăiere are doar jumătate din valoarea care ar caracteriza sistemul în iluminare incoerentă:

$$r_0 = \frac{n' \sin \tilde{\alpha}'}{\lambda}. \quad (2.81)$$

Rezultă că iluminarea coerentă asigură contrast mai bun, iluminare globală mai mare a imaginii, dar rezoluție limită înjumătățită față de performanțele aceluiași sistem iluminat incoerent.

2.4. CONCLUZII

În capitolul 2 au fost prezentați sintetic parametri utilizați pentru a aprecia calitatea imaginii sistemelor optice și metodele pe care se bazează algoritmi de calcul ai acestora.

În prezent, pe lângă aberațiile deduse pe criterii geometrice se apelează și modelul ondulatoriu al luminii, conceptul central fiind frontul de undă. Deformația acestuia în raport cu o sferă ideală se definește ca aberație de undă sau diferență de drum optic. Acest parametru poate fi asociat aberațiilor geometrice, astfel încât se pot face interpretări imediate ale influenței aberațiilor asupra frontului de undă sau se pot impune toleranțe ale aberației de undă, care implicit stabilesc și valorile admise ale aberațiilor.

Cei mai sensibili parametri de calitate a imaginii rezultă prin analiză Fourier, respectiv prin determinarea elementelor funcției optice de transfer.

Tabelul 2.6 prezintă, în esență, parametrii de calitate a imaginii și metodele necesare deducerii lor. Pe parcursul capitolului sunt descrise și analizate elementele înscrise în tabel.

Tabelul 2.6

Nr.crt.	Parametru de calitate a imaginii	Simbol	Metode de calcul
1	Aberația sferică transversală și axială	dy', ds'	Trasare paraxială și trigonometrică a razelor obiective
2	Coma tangențială și sagitală	k_T, k_S	Trasare paraxială și trigonometrică a razelor obiectivă și pupilară principală
3	Curburile astigmatice de câmp tangențială și sagitală	z_T, z_S	Trasare paraxială și trigonometrică a razelor obiectivă și pupilară principală; Trasarea oblică a razelor
4	Distorsiunea	$d\tilde{y}'_{\%}$	Trasare paraxială și trigonometrică a razelor obiectivă și pupilară principală
5	Aberația de undă	OPD, RMS OPD	Calcul geometric
6	Diagrama spot	-	Trasare vectorială a razelor
7	Funcția imagine a punctului	PSF	Analiză Fourier
8	Funcția optică de transfer de modulație	MTF	Analiză Fourier
9	Funcția optică de transfer de fază	PTF	Analiză Fourier
10	Funcția imagine a liniei	LSF	Analiză Fourier
11	Raportul Strehl	Strehl	Funcție de OPD sau MTF
12	Criteriul Rayleigh	RL	Impune valoarea minimă $OPD = \lambda/4$ pentru sisteme limitate la difracție

Valorile efective ale parametrilor de calitate a imaginii determină calificativul de apreciere a sistemului optic analizat. În tabelul 2.7 este redată o clasificare a sistemelor optice, pe criteriul calității, conform standardelor actuale.

Tabelul 2.7

Parametru	Toleranțe pentru sistem optic comercial	Toleranțe pentru sistem optic precis	Toleranțe pentru sistem optic limitat la difracție
RMS OPD	0.25λ	0.1λ	$<0.07\lambda$
OPD	2λ	0.5λ	$<0.25\lambda$

Se observă faptul că cea mai importantă caracteristică pentru analiză este considerată aberația de undă, care reprezintă elementul de legătură atât cu parametrii geometrici, cât și cu parametrii Fourier. Rezultă, de asemenea, că atributul de limitat la difracție revine sistemelor care îndeplinesc criteriul Rayleigh. Echivalența informativă între criteriul Rayleigh, Raportul Strehl, OPD, RMS OPD și toleranțele aberațiilor geometrice (pentru criteriul Rayleigh $\lambda/4$) sunt prezentate în tabelul 2.8.

Tabelul 2.8

OPD	RMS OPD	Raport Strehl	ds'	k_T	z_T, z_S	Calitatea sistemului
0.0	0.0	1.00				ideal
0.25 RL= $\lambda/16$	0.018 λ	0.99				
0.5 RL= $\lambda/8$	0.036 λ	0.95				
1.0 RL= $\lambda/4$	0.07 λ	0.80	$ds'_{Mmax} = \pm 16\lambda \left(\frac{f'}{D}\right)^2$	$k_T = \pm \frac{1.5\lambda}{n' \sin \sigma'}$	$\delta = \pm 2\lambda \left(\frac{f'}{D}\right)^2$	limitat la difracție
2.0 RL= $\lambda/2$	0.14 λ	0.40				precis
3.0 RL=0.75 λ	0.21 λ	0.10				comercial
4.0 RL= λ	0.29 λ	0.00				

Analiza completă a unui sistem optic, cuprinzând toate elementele descrise mai sus impune cu necesitate utilizarea calculului automat, atât datorită volumului foarte mare de lucru, cât și metodelor numerice iterative utilizate în rezolvarea integralelor necesare pentru analiza Fourier.

Printre contribuțiile originale ale autorului se pot menționa:

- Sinteza informației dintr-un material extrem de vast, eterogen ca metodă de abordare, de largă acoperire privind școlile europene și americane de inginerie optică, având în vedere metodele moderne de apreciere a calității sistemelor optice
- Adaptarea metodelor de calcul la convențiile de semne din standardul românesc STAS 3003-79
- Sinteza criteriilor geometrice și ondulatorii de apreciere a calității și echivalarea acestora

Bibliografie: [C2], [C3], [C5], [D1], [D2], [G1], [G2], [G4], [G5], [G9], [G11], [G13], [H2], [K1], [M1], [M3], [M4], [N1], [N2], [N5], [N6], [O1], [O2], [P1], [P6], [S1], [S3], [S4], [S6], [S7], [S9], [S10], [S12], [S13], [W1], [W2], [W5], [W8], [W10], [W13], [W14]

3. ANALIZA INFLUENȚEI ERORILOR DE EXECUȚIE ȘI MONTAJ ASUPRA CALITĂȚII IMAGINII. MODELARE ȘI SIMULARE

3.1. ANALIZA UNUI DUBLET ACROMAT LIMITAT LA DIFRAȚIE

3.1.1. Caracteristicile sistemului ideal (fără erori de execuție și montaj)

Se consideră oportună o analiză a sistemelor optice de complexitate gradual crescătoare. Se impune totuși condiția ca sistemul ideal din punct de vedere al geometriei și poziției relative a componentelor să fie limitat la difracție.

Cel mai simplu subansamblu optic care îndeplinește aceste condiții este dubletul acromat, format din două lentile lipite. Lentila singulară nu poate constitui un sistem limitat la difracție datorită numărului insuficient de grade de libertate pentru corectarea aberațiilor.

Cele trei raze ale dubletului lipit pun la dispoziție trei grade de libertate care sunt utilizate pentru impunerea puterii și corectarea a două aberații semnificative – în general aberația sferică și cea cromatică.

S-a procedat la sinteza unui dublet prin metoda Kingslake-Conrady, iar soluția a fost analizată cu programul dedicat de calcul optic OSLO LT, oferit de firma Sinclair Optics.

Datele de intrare impuse la proiectarea dubletului sunt: $f'=100\text{mm}$, $f'/D=1/5$, $2\omega=5^\circ$, sorturi de sticle optice LAK23 și LASF36A, din catalogul Schott 2000. S-au utilizat indicii de refracție de calcul din sistemul e-F'-C', corespunzători liniilor spectrale cu lungimile de undă 546.074nm, 479.992 nm și respectiv 643.850 nm.

S-a urmărit obținerea unei soluții Fraunhofer (crown-în-față), care pentru perechea de materiale alese a condus la un dublet cu formă optimă (lentilă convergentă biconvexă și lentilă divergentă menisc).

În figura 3.1 este prezentată o captură de ecran cu foaia de date a dubletului, care conține valorile razelor pe coloana "RADIUS", grosimile componentelor pe coloana "THICKNESS", deschiderea fasciculului pe coloana "APERTURE RADIUS" și sorturile de sticlă optică pe ultima coloană, "GLASS".

Raza și înclinarea fasciculului incident sunt introduse în celulele "Ent beam radius" și "Field angle". Modulul de calcul paraxial al programului determină automat valoarea caracteristicilor de referință ale sistemului: distanța focală "Efl" și frontifocala imagine paraxială înscrisă pe linia "IMS" în coloana "THICKNESS".

Sistemul a fost defocusat pentru stabilirea celei mai bune abscise a planului imagine prin minimizarea rădăcinii medii pătratice a frontului de undă pe întreaga apertură a sistemului.

Pentru estimarea rapidă, sensibilă și sintetică a sistemului s-au ales ca parametri reprezentativi de calitate Raportul Strehl și RMS OPD. Valorile acestora redate în subsolul

foii de date indică o foarte bună calitate a imaginii formate de sistemul analizat, pe care îl încadrează în categoria limitat la difracție.

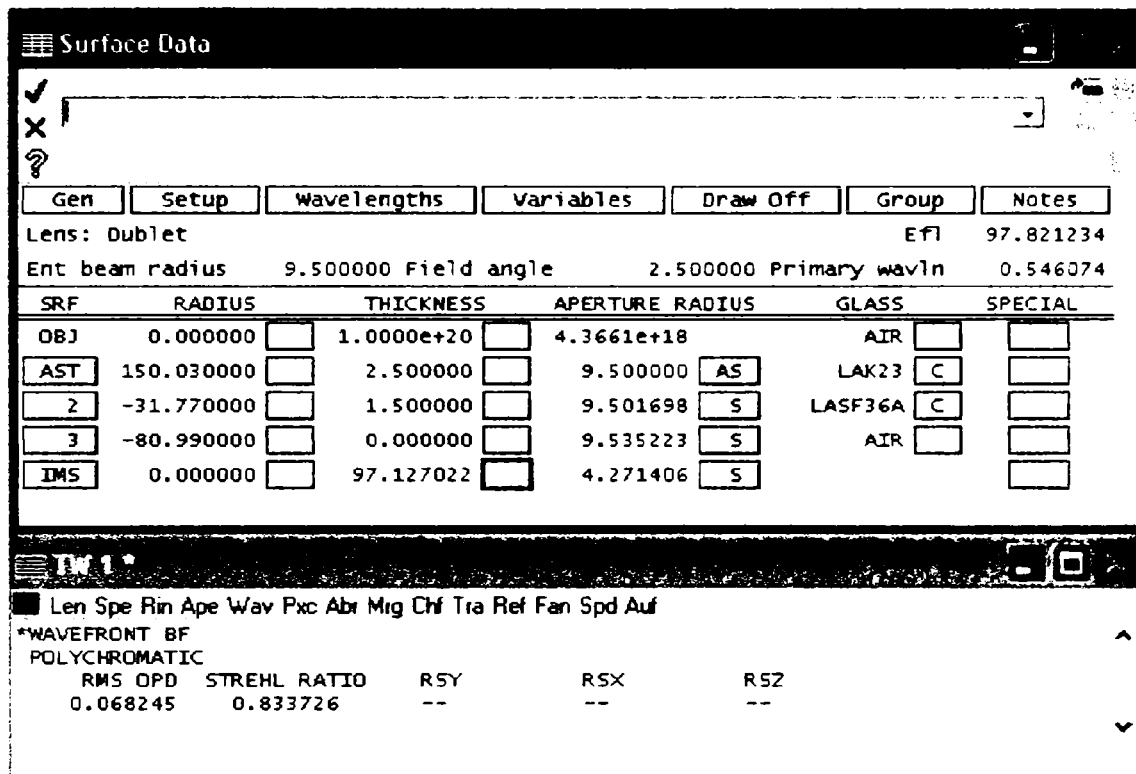


Fig.3.1. Foaia de date a dubletului și parametrii sintetici de calitate RMS OPD și Ströhl

O analiză mai detaliată a calității imaginii confirmă această încadrare, așa cum rezultă din figurile următoare.

Aberațiile geometrice și cromatice prin componentele lor axiale și transversale sunt prezentate sub forma unor variații grafice în figura 3.2. Alura și valorile acestor aberații confirmă calitatea bună a sistemului. Se observă, de exemplu, că aberația sferică axială maximă se află în jurul valorii de 0.05mm, valoare mult inferioară celei impuse de criteriul Rayleigh $\lambda/4$:

$$ds' = \pm 16\lambda \left(\frac{f'}{D} \right)^2 = \pm 16 * 0.000555 * 5^2 = \pm 0.22\text{mm} . \quad (3.1)$$

Distorsiunea are o valoare nesemnificativă pe întreaga apertură, iar curburile astigmatice de câmp au valori minime cel puțin pe trei sferturi din deschiderea utilă.

Din punct de vedere cromatic subansamblul are, de asemenea, o comportare foarte bună, cu alură specifică dubletului acromat lipit. Aberația cromatică axială maximă este inferioară valorii impuse de criteriul Rayleigh:

$$ds'_{cr} = \pm 2.5 \frac{\lambda}{n' \sin^2 \sigma'} = \pm 2.5 * \frac{0.000555}{0.1^2} = \pm 0.138\text{mm} . \quad (3.2)$$

Cromatismul lateral este submicrometric, iar spectrul secundar maxim este mai mic

decât 0.125 mm.

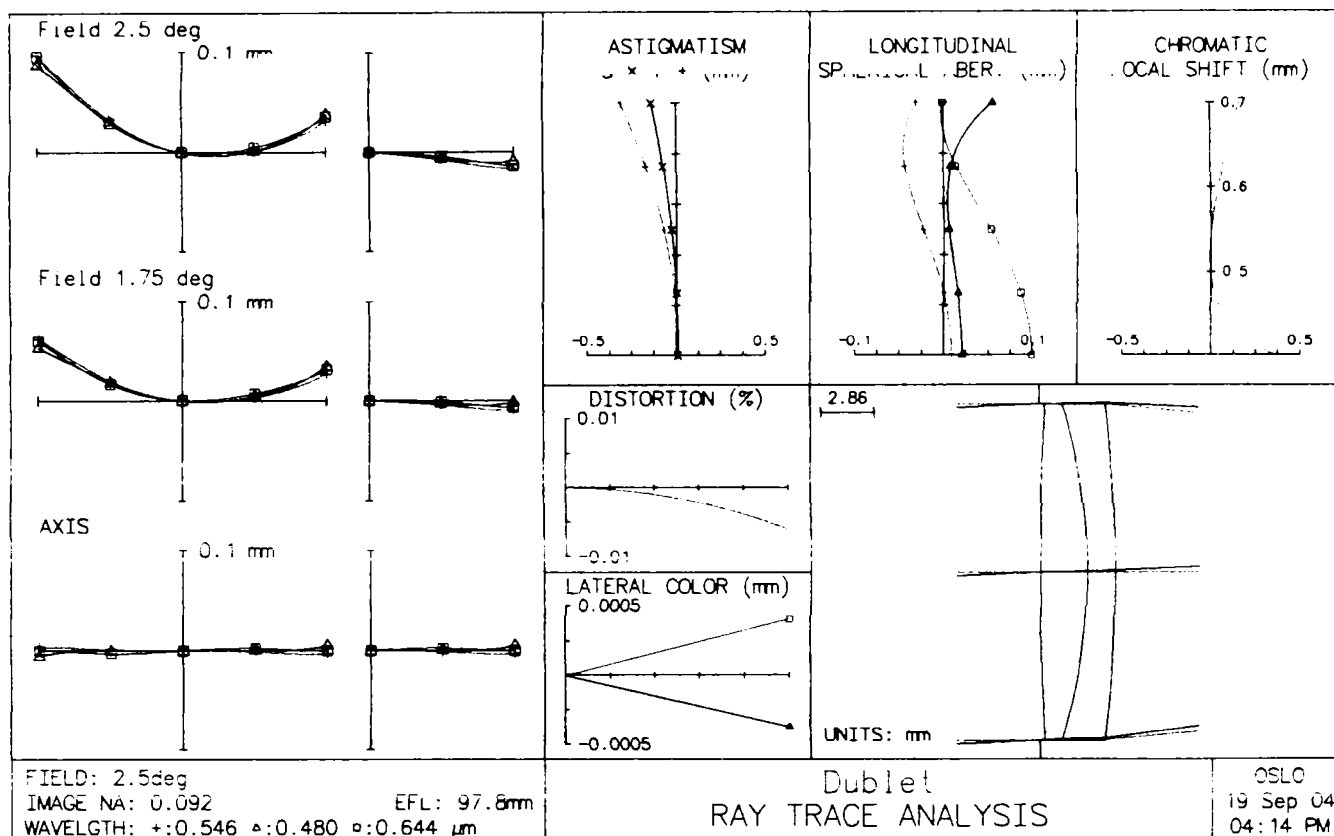


Fig.3.2. Variația aberațiilor geometrice și cromatice, axiale și transversale ale dubletului LAK23-LASF36A

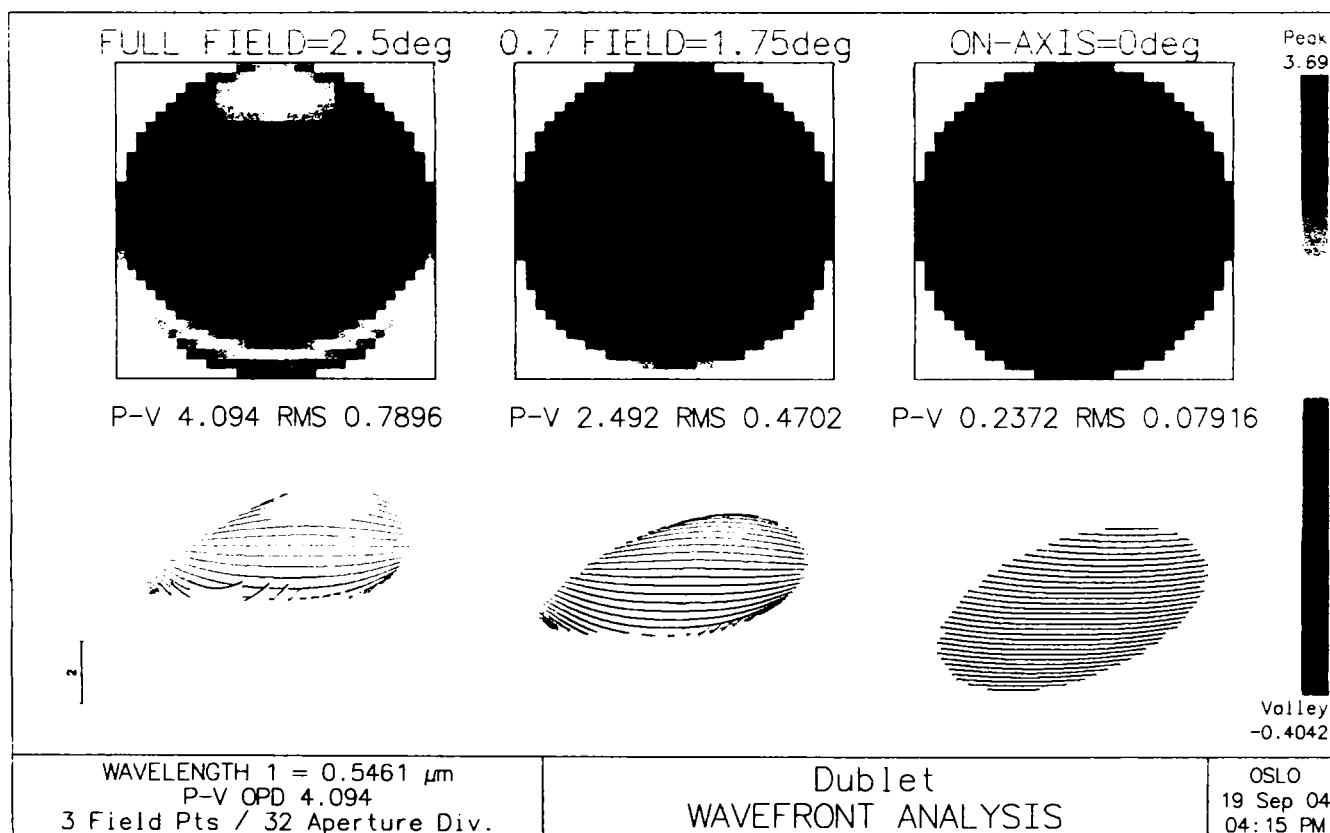


Fig.3.3. Analiza frontului de undă imagine pentru diverse deschideri ale fasciculului incident, măsurate prin unghiul dintre raza pupilară principală și axa optică

Figura 3.3 pune în evidență forma și dimensiunile frontului de undă la diverse înclinări ale razei pupilare principale și parametrii ondulatorii OPD și RMS OPD, determinați prin analiza statistică a frontului de undă imagine.

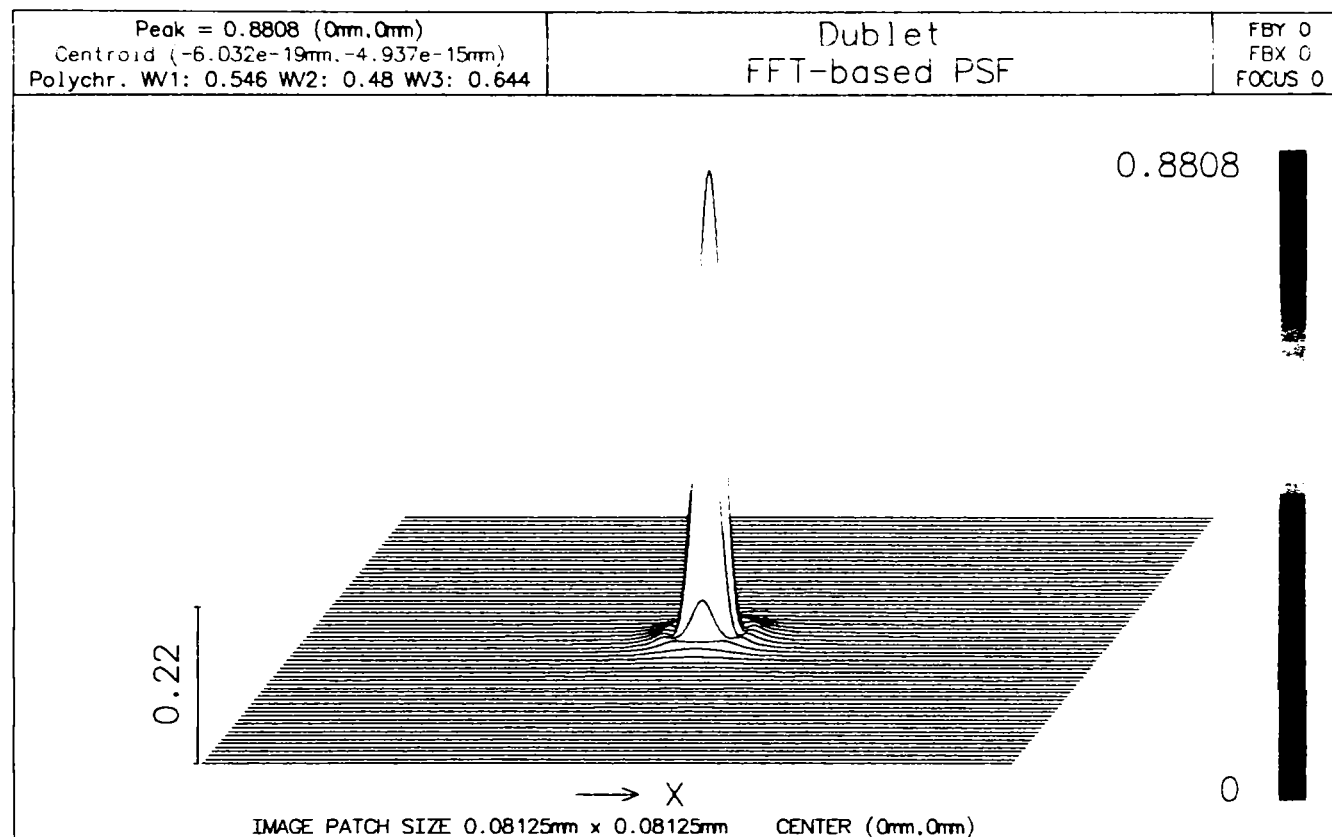


Fig.3.4. Funcția imagine a punctului (PSF)

Funcția imagine a punctului – PSF – (fig.3.4) indică valoarea 0.88, superioară limitei impuse de criteriul Rayleigh (0.80).

Funcția optică de transfer de modulație (fig.3.5) are o alură apropiată de cea ideală, ceea ce asigură o iluminare globală corespunzătoare în planul imagine. Frecvența de tăiere confirmă valoarea teoretică:

$$r_{lim} = \frac{1}{\lambda \left(\frac{f'}{D} \right)} = \frac{1}{0.000555 * 5} = 360 \text{ linii/mm.} \quad (3.3)$$

Funcția optică de transfer de fază (fig.3.5) este o orizontală la ordonata nulă atât pentru planul tangențial cât și pentru cel sagital, ceea ce confirmă absența distorsiunilor geometrice și a inversiunilor de contrast în planul imagine.

Având în vedere analiza detaliată de mai sus, care arată că toți parametrii de calitate urmăriți conduc la concluzii convergente privind calitatea imaginii se consideră ca validă echivalența acestora enunțată în capitolul anterior și se apreciază ca suficientă determinarea unui număr restrâns de indicatori ca relevanți. În cele ce urmează vor fi apelate ca cele mai sintetice caracteristici de calitate a imaginii valorile RMS OPD și Raportul Strehl.

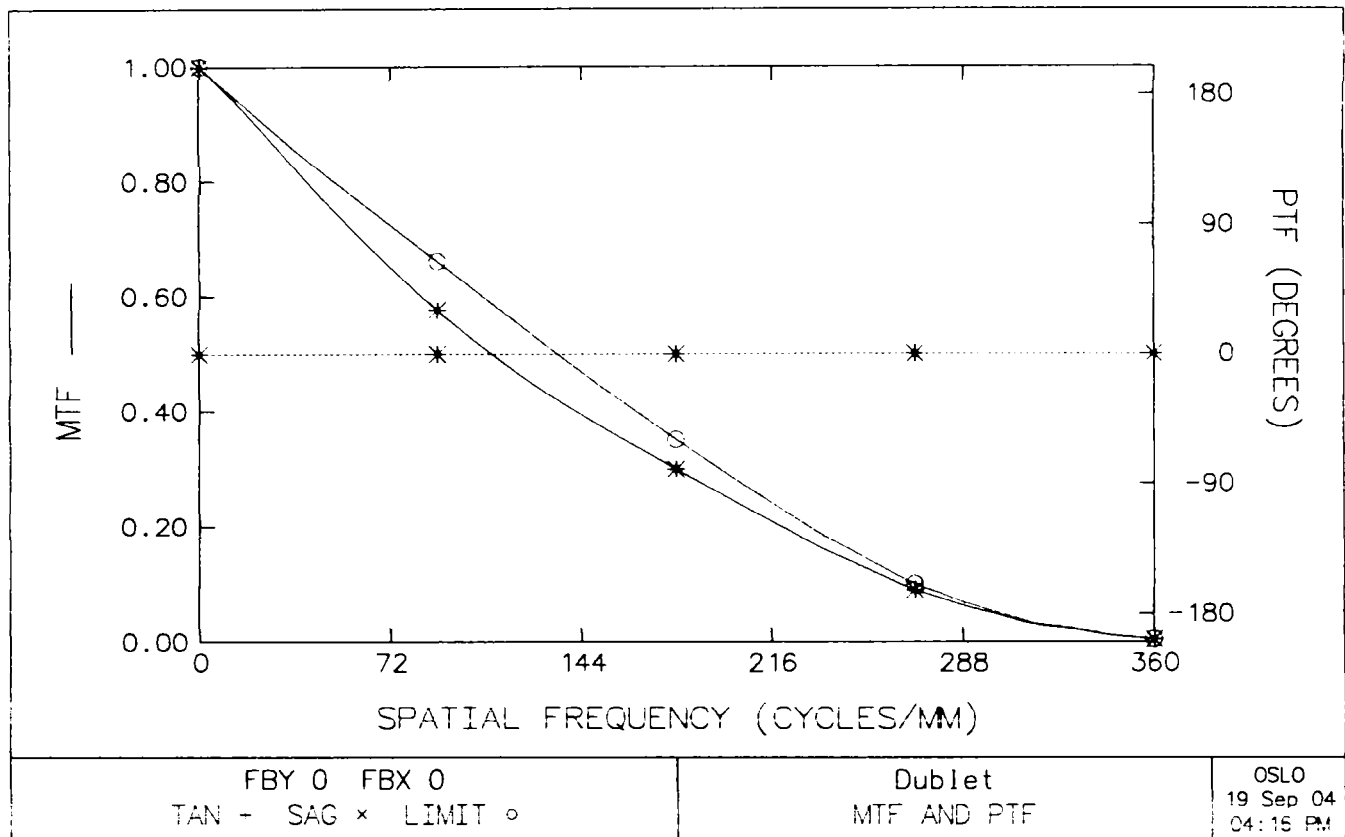


Fig.3.5. Funcția optică de transfer de modulație (MTF) și funcția optică de transfer de fază (PTF)

Analiza prezentată anterior a considerat sistemul ideal din toate punctele de vedere (formă, dimensiuni și aliniere a dioptrilor). Urmează un studiu al toleranțelor dimensionale și de poziție admise la execuția și montajul subansamblului, astfel încât calitatea imaginii să păstreze calificarea sistemului în categoria limitat la difracție.

3.1.2. Influența erorilor de execuție

În urma procesului de prelucrare a unui reper optic pot apărea următoarele erori de execuție:

- abateri de la valoarea nominală a razelor
- abateri de la valoarea nominală a grosimilor
- abateri de la forma nominală sferică, plană sau asferică a dioptrilor.

Abaterile de la valoarea nominală a razelor se măsoară prin numărul de inele de interferență, care este apreciat de către operator în urma așezării calibrului optic pe suprafața prelucrată.

Abaterile de la grosimea nominală rezultă printr-o metodă mecanică oarecare de măsurare a lungimilor, adaptată la condițiile concrete impuse de geometria piesei, domeniul și precizia de măsurare.

Abaterile de formă de la forma nominală a dioptrilor sunt apreciate subiectiv, de către

operator, prin evaluarea formei inelelor de interferență vizibile prin calibrul optic. Distorsiunile locale ale inelelor indică abateri locale de la forma nominală. Forma necirculară a inelelor (eliptică, curbă simetrică sau asimetrică, convexă sau concavă, închisă sau deschisă, cu discontinuități) semnifică o abatere globală a formei dioptrei de la cea nominală. Având în vedere două elemente, și anume că:

- se urmărește execuția unui sistem de cea mai bună calitate
- aprecierea circularității inelelor se face subiectiv, prin aspectare vizuală de către operator,

Se consideră că prezența abaterilor de formă descalifică total piesa optică.

Cu considerațiile de mai sus, rezultă că este rațional un studiu al abaterilor admise la dimensiunile razelor și grosimilor. Criteriile de stabilire a acestora vizează două aspecte:

- asigurarea calității imaginii la parametri care îndeplinesc criteriul Rayleigh și caracterizează sistemul ideal geometric rezultat prin sinteză
- menținerea puterii sistemului optic real la valori cât mai apropiate de cele teoretice. În acest sens se admite o toleranță la distanța focală de $\pm 1\%$.

Cu ajutorul programului OSLO LT s-au modelat abateri de la valorile nominale ale razelor și grosimilor și s-a urmărit influența atât a fiecărui parametru individual, cât și a efectului cumulat al tuturor elementelor afectate de erori. Criteriile de apreciere a influenței au fost distanța focală, indicatorul statistic ondulatoriu RMS OPD și parametrul energetic Strehl.

În tabelele 3.1...3.3 sunt redate rezultatele simulării abaterilor de la valorile nominale ale celor trei raze ale dubletului propus pentru analiză.

Primele două coloane conțin abaterea procentuală a dimensiunii și respectiv valoarea efectivă a razei diferite de cea nominală, marcată cu caractere boldate, care subliniază întreaga linie aferentă. S-au considerat atât abateri pozitive, cât și negative.

Coloanele 3 și 4 conțin valorile distanței focale și abaterile procentuale în raport cu cea de referință.

Următoarele două coloane prezintă valorile criteriilor de calitate RMS OPD (exprimat în număr de lungimi de undă) și Strehl.

Ultima coloană precizează numărul de inele de interferență care se formează pentru abaterea înscrisă pe prima coloană. Numărul de inele N , s-a determinat cu relația:

$$N = \frac{\Delta r}{\left(\frac{2r}{D}\right)^2 \lambda}, \quad (3.4)$$

unde Δr reprezintă valoarea absolută a abaterii, r – raza nominală, D – deschiderea lentilei, λ - lungimea de undă de vizare, care a fost considerată la valoarea de 500 nm.

Deasupra fiecărui tabel este înscrisă valoarea nominală a razei vizate.

Fiecare tabel este urmat de două reprezentări grafice care ilustrează variația focalei respectiv a parametrilor RMS OPD și Strehl în raport cu abaterea procentuală analizată. Graficele pun în evidență intensitatea și viteza de variație a influenței abaterii asupra criteriilor de calitate urmărite. În acest scop s-au atașat reprezentărilor și curbele de interpolare sau dreptele de regresie, cu expresiile lor analitice, care permit atât aprecieri calitative, cât și cantitative. S-au înscris, de asemenea, valorile factorilor de corelație, care în toate cazurile fiind foarte apropiați de unitate, asigură un grad înalt de precizie a aprecierii prin interpolare (fig. 3.6...3.11).

În tabele, categoriile de calitate au fost marcate după cum urmează:

- liniile colorate în galben corespund unor parametri $|\Delta f'| < 1\%$, $RMS\ OPD < 0.07\lambda$, $Strehl > 0.8$ și indică păstrarea încadrării în categoria limitat la difracție
- liniile colorate în gri corespund unor parametri $|\Delta f'| < 1\%$, $RMS\ OPD = (0.07 \dots 0.1)\lambda$ sau/și $Strehl = (0.8 \dots 0.40)$ și descriu o calitate medie a sistemului
- liniile fără culoare de marcaj corespund unor parametri $|\Delta f'| > 1\%$ și/sau $RMS\ OPD > 0.1\lambda$ și/sau $Strehl < 0.40$.

Tabelul 3.1

$r_1 = 150.03\text{ mm}$

Δr [%]	r [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [%]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	N [-]
10.0	165.00	101.796888	4.06	0.103910	0.635421	-
7.0	160.50	100.647486	2.89	0.089598	0.708003	-
5.0	157.50	99.860002	2.08	0.081086	0.753744	-
2.0	153.00	98.645521	0.84	0.071396	0.808845	24
1.0	151.53	98.231525	0.42	0.069407	0.822039	12
0.5	150.75	98.022763	0.21	0.068710	0.827971	6
0.1	150.15	97.854899	0.04	0.068308	0.832707	1
0.0	150.03	97.821234	0.00	0.060045	0.874257	0
-0.1	149.85	97.770679	-0.05	0.068166	0.831460	1
-0.5	149.25	97.601664	-0.22	0.067979	0.838363	6
-1.0	148.50	97.389305	-0.44	0.067966	0.840703	12
-2.0	147.00	96.960917	-0.88	0.068686	0.844817	24
-5.0	142.50	95.645622	-2.22	0.076878	0.833265	-
-7.0	139.50	94.742753	-3.15	0.086928	0.803431	-
-10.0	135.00	93.347559	-4.57	0.107442	0.726315	-

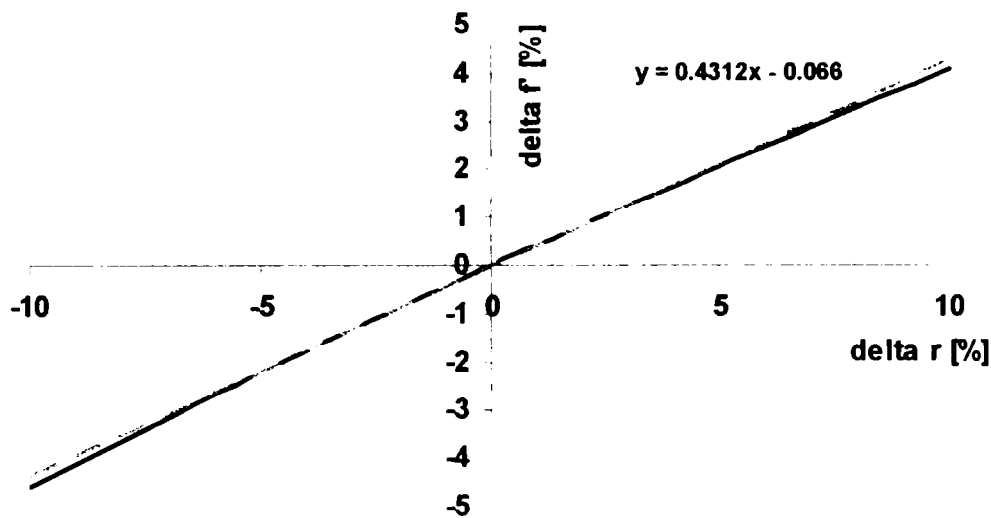


Fig.3.6. Variația procentuală a distanței focale funcție de abaterea procentuală de la raza nominală r_1

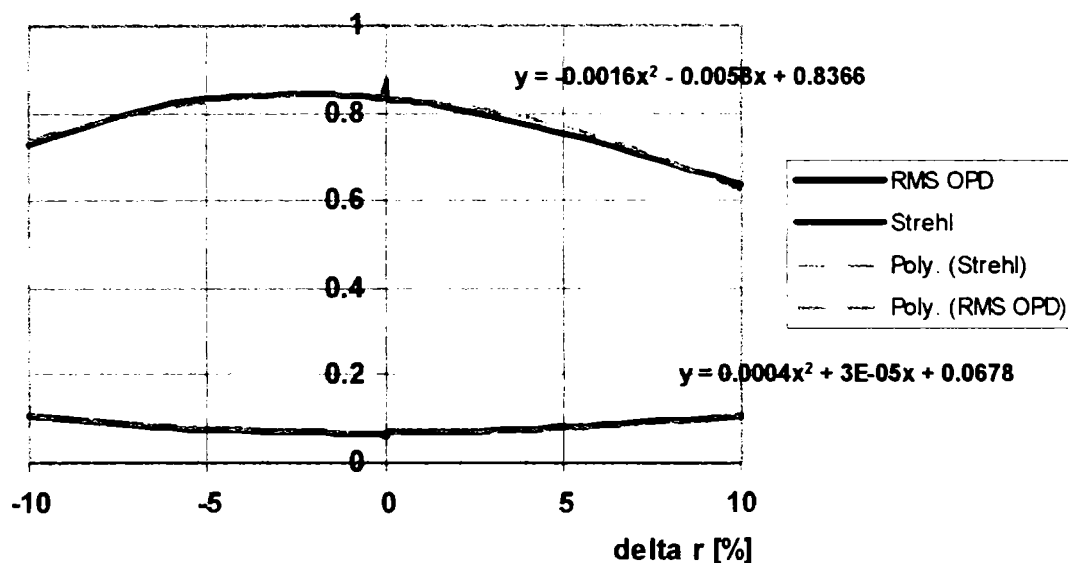


Fig.3.7. Variația parametrilor RMS OPD și Strehl funcție de abaterea procentuală de la raza nominală r_1

Tabelul 3.2

$r_2 = - 31.77 \text{ mm}$

Δr [%]	r [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [%]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	N [-]
5.0	-33.36	96.004386	-1.86	0.218045	0.322241	-
2.0	-32.41	97.060210	-0.78	0.106709	0.718802	-
1.0	-32.09	97.435442	-0.39	0.077820	0.829921	-
0.5	-31.93	97.626990	-0.20	0.069608	0.846452	29
0.1	-31.81	97.772417	-0.05	0.067869	0.839645	7
0.0	-31.77	97.821234	0.00	0.060045	0.874257	0
-0.1	-31.74	97.857959	0.04	0.068846	0.824824	5
-0.5	-31.61	98.018231	0.20	0.074392	0.791727	-
-1.0	-31.45	98.218039	0.41	0.086713	0.727420	-
-2.0	-31.13	98.626334	0.82	0.122465	0.565944	-
-5.0	-30.18	99.911245	2.14	0.261452	0.248690	-

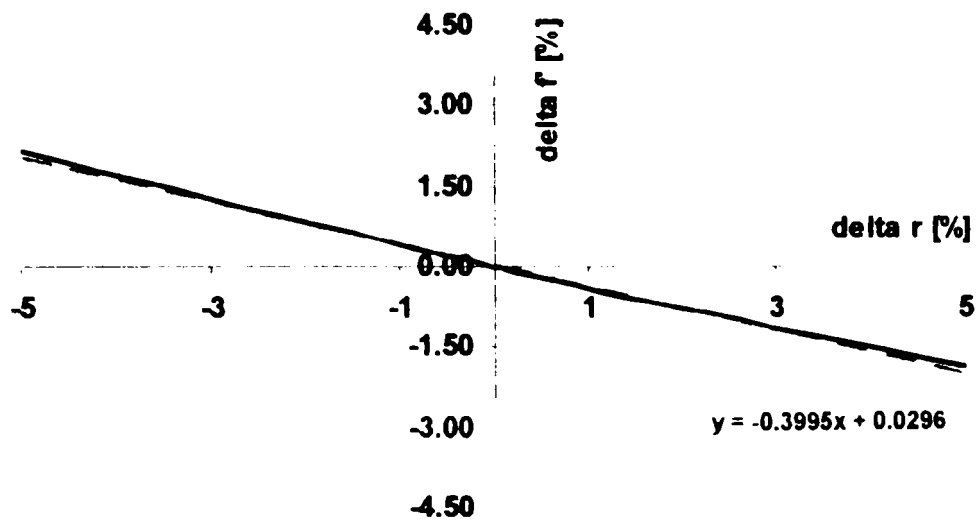


Fig.3.8. Variația procentuală a distanței focale funcție de abaterea procentuală de la raza nominală r_2

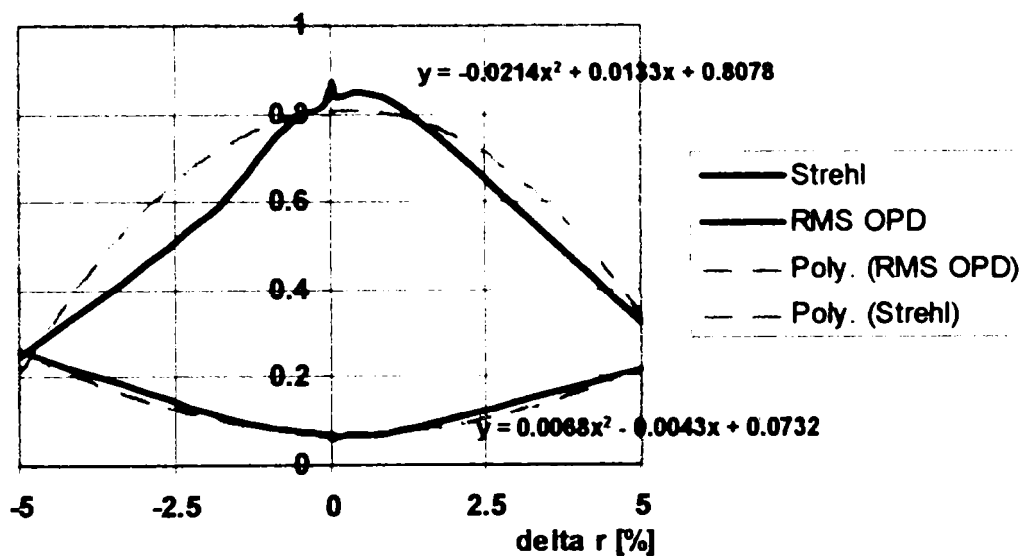


Fig.3.9. Variația parametrilor RMS OPD și Strehl funcție de abaterea procentuală de la raza nominală r_2

Tabelul 3.3

$r_3 = -80.99 \text{ mm}$

Δr [%]	r [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [%]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	N [-]
5.0	-85.04	102.520518	4.80	0.187255	0.362056	-
2.0	-82.61	99.703063	1.92	0.102017	0.654865	-
1.0	-81.80	98.762501	0.96	0.079624	0.762666	22
0.5	-81.39	98.286146	0.48	0.071955	0.805419	11
0.1	-81.07	97.914230	0.10	0.068655	0.823867	2
0.0	-80.99	97.821234	0.00	0.060045	0.874257	0
-0.1	-80.91	97.728231	-0.10	0.071741	0.798749	2
-0.5	-80.59	97.356150	-0.48	0.069065	0.843986	11
-1.0	-80.18	96.879260	-0.96	0.074634	0.836738	22
-2.0	-79.37	95.936578	-1.93	0.096481	0.761611	-

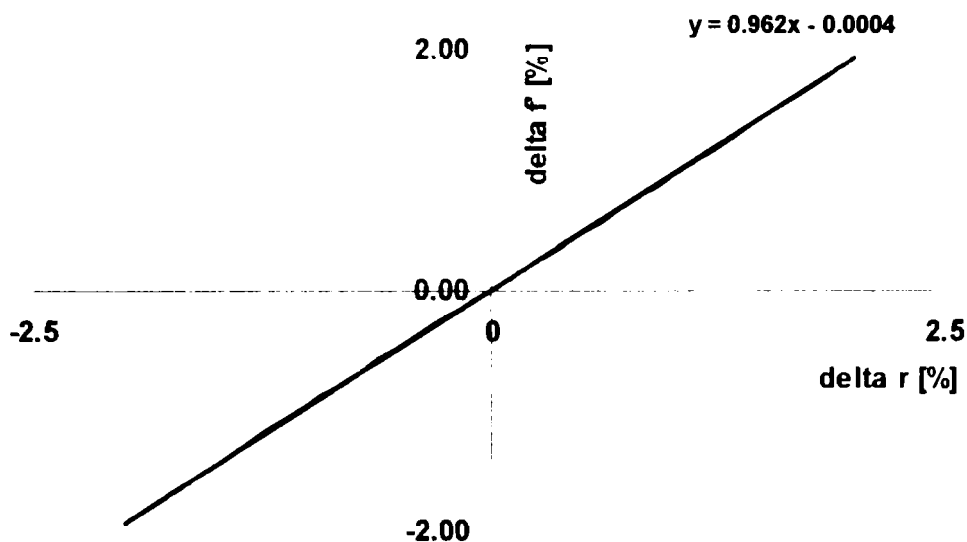


Fig. 3.10. Variația procentuală a distanței focale funcție de abaterea procentuală de la raza nominală r_3

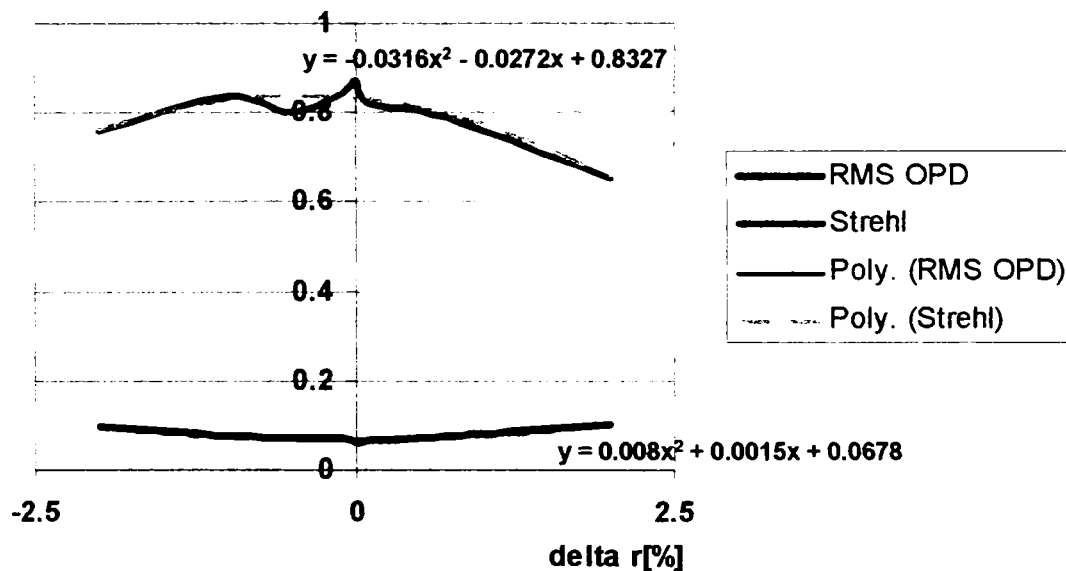


Fig. 3.11. Variația parametrilor RMS OPD și Strehl funcție de abaterea procentuală de la raza nominală r_3

Tabele 3.4 și 3.5 redau un studiu al influenței grosimii lentilelor care formează dubletul.

Se observă că pentru valorile reduse ale grosimilor nominale (lentilele sunt foarte subțiri) nu pot fi puse în evidență influențe semnificative nici asupra puterii, nici asupra calității imaginii.

Tabelul 3.4

$d_1 = 2.5 \text{ mm}$

Δd [%]	d [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [%]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]
20.0	3.00	97.895888	0.08	0.067859	0.835743
15.0	2.88	97.877961	0.06	0.067947	0.835404
10.0	2.75	97.858547	0.04	0.068046	0.835856
0.0	2.50	97.821234	0.00	0.060045	0.874257
-10.0	2.25	97.783950	-0.04	0.068458	0.831635
-15.0	2.13	97.766063	-0.06	0.068565	0.831507
-20.0	2.00	97.746694	-0.08	0.068685	0.830221

Tabelul 3.5

$d_2 = 1.5 \text{ mm}$

Δd [%]	d [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [%]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]
20.0	1.8	97.827288	<0.1	0.068204	0.833659
15.0	1.73	97.825875	<0.1	0.068213	0.834192
10.0	1.65	97.824261	<0.1	0.068224	0.833755
0.0	1.50	97.821234	<0.1	0.060045	0.874257
-10.0	1.35	97.818207	<0.1	0.068266	0.833030
-15.0	1.28	97.816795	<0.1	0.068276	0.833284
-20.0	1.20	97.815181	<0.1	0.068287	0.833517

Urmărind rezultatele simulărilor prezentate mai sus se pot formula următoarele concluzii privind efectul individual al erorilor de execuție:

- cea mai importantă influență asupra parametrilor nominali ai sistemului optic o au abaterile de la razele nominale
- aceste abateri dimensionale afectează atât puterea optică, cât și calitatea imaginii
- influența cea mai semnificativă a abaterilor de la razele nominale se manifestă asupra puterii optice; în acest sens, tolerarea distanței focale cu $\pm 0.1 \text{ mm}$ ar impune abateri maxime ale tuturor razelor de $\pm 0.1\%$, deși parametrii de calitate ar permite limite mult mai largi
- cele trei raze ale dubletului implică variații cu intensitate și gradient diferite asupra puterii și calității sistemului. Din punctul de vedere al ordinii dioptrilor, prima rază este cea mai slab influențată, celelalte două având efecte similare la abateri cu un ordin de mărime mai scăzut
- prescrierea numărului de inele de interferență, ca măsură a abaterilor maxime admise presupune o strictă individualizare, având în vedere că depinde direct de valoarea razei nominale și apertura componentei. Ca urmare, recomandările din literatură prezentate în tabelul 1.10 pot avea un caracter pur orientativ.

Numărul de inele este invers proporțional cu pătratul razei nominale și direct proporțional cu apertura componentei. Această dependență relativ complexă exclude caracterul de absolut al semnificației numărului de inele. Spre exemplificare se consideră un șir de raze cuprins în domeniul uzual [50...250]mm și o abatere absolută de la raza nominală $\Delta r=0.5\text{mm}$. Pentru aceeași deschidere $D=20\text{mm}$ și lungimea de undă $\lambda=500\text{nm}$, în tabelul 3.6 sunt calculate numărul de inele N aferent abaterii și expresia procentuală a acesteia.

Tabelul 3.6

r [mm]	N [-]	Δr [%]
50	40.00	1.00
75	17.78	0.67
100	10.00	0.50
125	6.40	0.40
150	4.44	0.33
175	3.27	0.29
200	2.50	0.25
250	1.60	0.20

Se observă că deși toate abaterile procentuale sunt mici (inferioare valorii de 1%) numărul de inele aferent abaterii diferă cu cel puțin un ordin de mărime. În figurile 3.12 și 3.13 sunt reprezentate variațiile numărului de inele și respectiv a abaterii procentuale pentru aceeași abatere absolută.

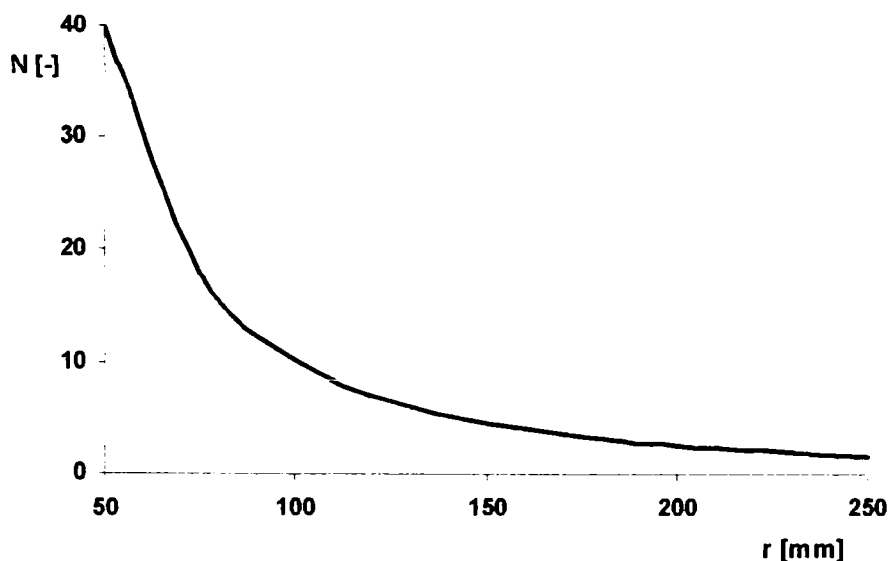


Fig.3.12. Numărul de inele de interferență funcție de raza nominală la aceeași abatere absolută și apertură

Rezultă că numărul de inele N prescris ca indicator de toleranță nu are o semnificație universală. La raze mici, N poate avea valori mult mai ridicate decât pentru razele mari. Impunerea unui număr N mic în toate cazurile poate însemna eforturi tehnologice excesive, inutile sau chiar imposibile.

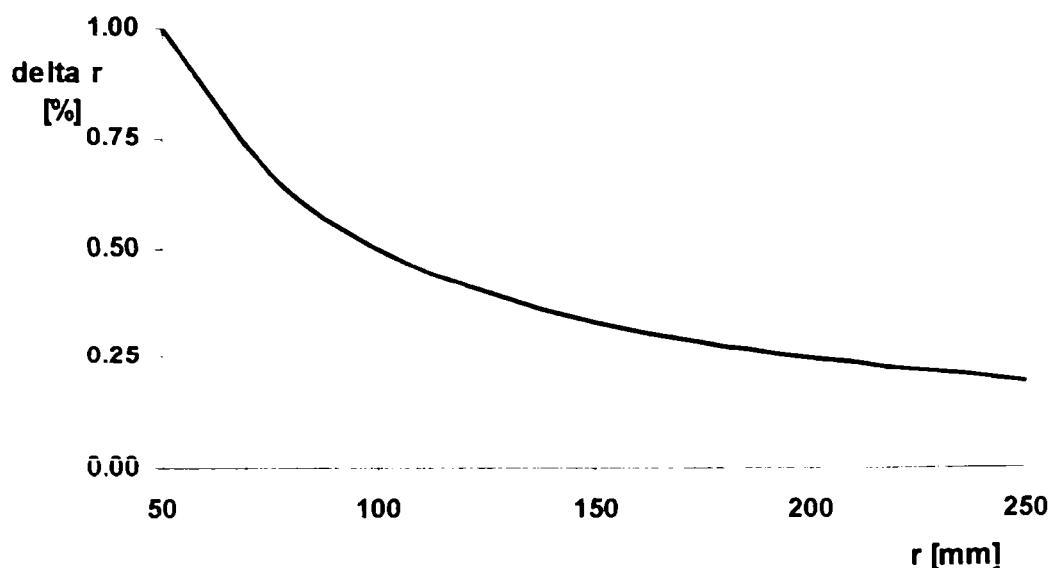


Fig.3.13. Variația abaterii procentuale în raport cu raza nominală la aceeași abatere absolută

- grosimea pieselor optice nu influențează calitatea imaginii pentru un sistem simplu, de tipul dubletului analizat și dacă valorile absolute ale grosimilor nominale sunt mici nu este afectată semnificativ nici puterea sistemului
- o tolerare a grosimilor cu $\pm(0.1...0.2)$ mm este întru totul acceptabilă.

3.1.3. Influența erorilor de montaj

Erorile de montaj pot cauza descentrări sau înclinări (rotiri) în raport cu oricare dintre cele trei axe de referință ale dioptriilor individual sau ale întregului subansamblu.

Aceste erori au la bază pozițiile reciproce relative ale dioptriilor diferite față de cele nominale, gabaritul radial și axial excedentar creat prin ajustajul cu joc prescris incorect pentru ansamblul componente optice-montură sau execuția cu abateri dimensionale și de formă mai mari decât cele admisibile pentru subansamblul optic și locașul din tubul mecanic.

Pentru analiza dubletului considerat se au în vedere următoarele elemente:

- dubletul este format din două lentile lipite, care din punct de vedere geometric constituie o piesă monobloc; în acest caz studiul efectelor abaterilor de poziție pe axa z – axa optică – este lipsit de interes. În cazul în care această abatere există (și poate fi declarată atunci când planul imagine are o abscisă fixată), ea poate fi compensată printr-o mică defocusare, ușor de realizat pe standul de verificare și reglare a subansamblului sau aparatului
- datorită simetriei de rotație în jurul axei z a componentelor sistemului, este suficientă studierea descentrării pe una dintre direcțiile axelor x sau y ; tot datorită simetriei

studiul este edificator pentru un singur sens al abaterii; în cele ce urmează va fi analizată influența descentrării cu valori pozitive, de-a lungul axei y; studiul descentrării nu vizează primul dioptru, a cărei axă geometrică are rol de element de referință

- tot din considerente de simetrie de rotație, rotirea dioptrilor în jurul axei z nu are sens, iar în jurul axelor y și x rotirile sunt echivalente ca efect, astfel încât s-a considerat oportun studiul înclinării dioptrilor numai în raport cu axa y.

În tabele 3.7...3.11 și figurile 3.14...3.18 sunt redate rezultatele numerice și grafice ale simulării erorilor de montaj pentru dubletul analizat.

Tabelele pun în evidență influența descentrării și înclinării asupra parametrilor de calitate RMS OPD și Strehl și, de asemenea, coordonatele focarului paraxial, a cărei poziției este deplasată în afara axei optice.

Prima linie a fiecărui tabel, subliniată prin boldarea caracterelor corespunde caracteristicilor sistemului ideal, neafectat de erori de poziție.

În culoare galbenă sunt marcate liniile pentru care sistemul este încă limitat la difracție ($RMS\ OPD < 0.07\lambda$ și $Strehl > 0.80$). Liniile subliniate prin culoare gri caracterizează o calitate medie a sistemului ($RMS\ OPD > 0.1\lambda$ sau și $Strehl > 0.40$). Liniile fără marcaj prin culoare exprimă o calitate a imaginii mult inferioară celei previzionate prin analiza sistemului rezultat prin sinteză și, ca urmare conțin caracteristici care nu pot fi considerate ca acceptabile.

Tabelul 3.7

Δy_2 [mm]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	Δy_F [mm]	Δz_F [mm]
0.000	0.060045	0.874257	0.00	0.00
0.001	0.068245	0.833751	-2.7737e-06	1.1819e-08
0.010	0.068308	0.833341	-2.7737e-05	1.1818e-06
0.050	0.069797	0.826451	-0.000139	2.9544e-05
0.100	0.074259	0.804943	-0.000277	0.000118
0.150	0.081153	0.770426	-0.000416	0.000266
0.200	0.089924	0.726513	-0.000555	0.000473
0.250	0.100082	0.674281	-0.000694	0.000739
0.300	0.111251	0.616653	-0.000833	0.001064
0.400	0.135616	0.498950	-0.001112	0.001892
0.500	0.161677	0.391921	-0.001391	0.002958
0.600	0.188759	0.306106	-0.001671	0.004261
0.800	0.244737	0.200660	-0.002236	0.007585

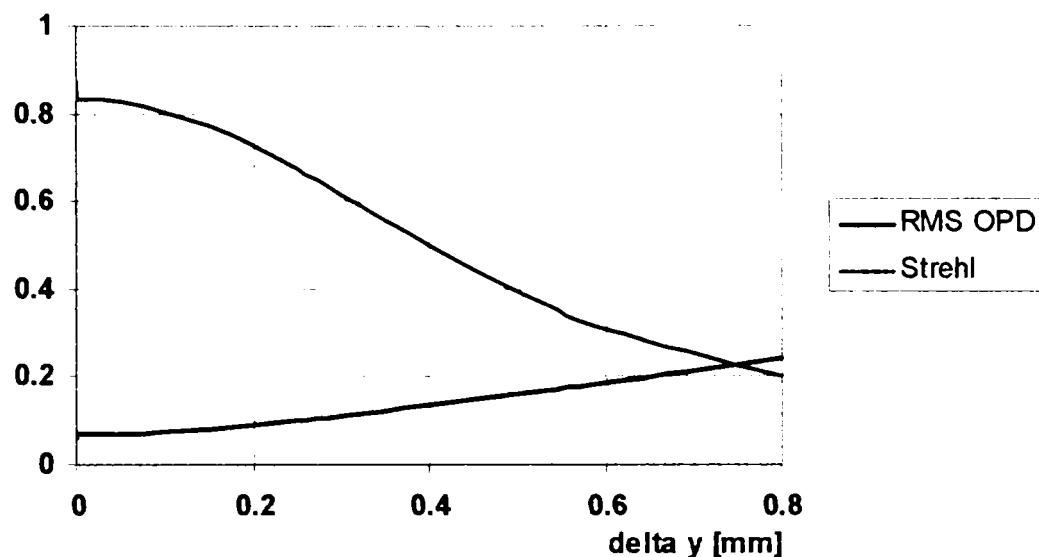


Fig.3.14. Variația parametrilor de calitate RMS OPD și Strehl funcție de descentrarea Δy_2

Tabelul 3.8

Δy_3 [mm]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	Δy_F [mm]	Δz_F [mm]
0.000	0.060045	0.874257	0.00	0.00
0.001	0.068254	0.833476	1.8341e-05	-4.8557e-08
0.010	0.069152	0.829513	0.000183	-4.8558e-06
0.050	0.088152	0.738645	0.000917	-0.000121
0.100	0.130810	0.528945	0.001834	-0.000486
0.150	0.180778	0.335144	0.002751	-0.001093
0.200	0.233414	0.220321	0.003668	-0.001942
0.250	0.287263	0.170559	0.004585	-0.003035

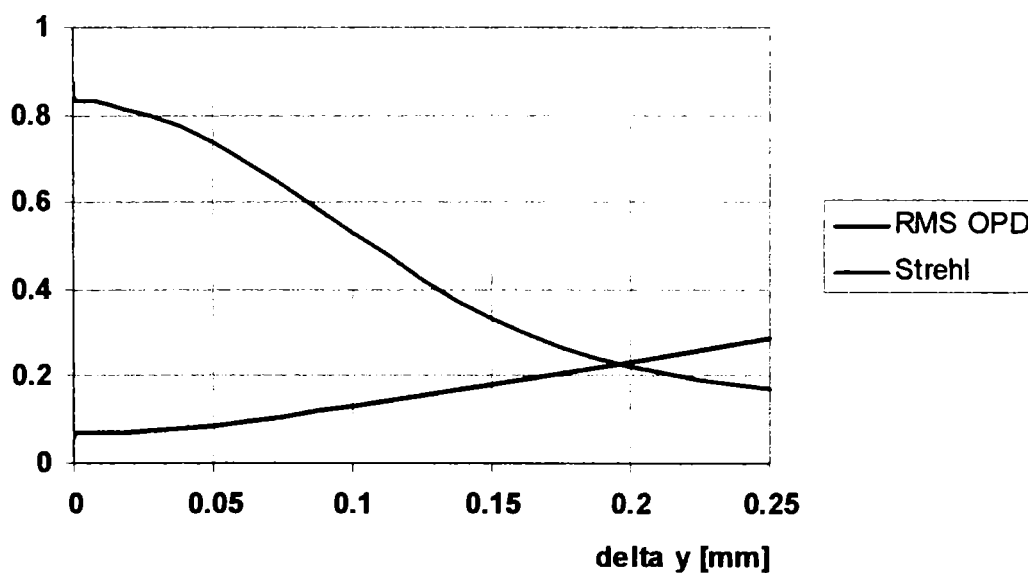


Fig.3.15. Variația parametrilor de calitate RMS OPD și Strehl funcție de descentrarea Δy_3

Tabelul 3.9

α_{y1} [°]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	$\Delta x_{F'}$ [mm]	$\Delta z_{F'}$ [mm]
0.0000	0.060045	0.874257	0.00	0.00
0.0003	0.068245	0.833608	1.9484e-06	-3.3841e-09
0.0010	0.068246	0.833474	6.4946e-06	-3.7615e-08
0.0020	0.068247	0.833574	1.2989e-05	-1.5046e-07
0.0200	0.068370	0.832920	0.000130	-1.5046e-05
0.0500	0.069021	0.830040	0.000325	-9.4039e-05
0.1000	0.071298	0.819736	0.000649	-0.000376
0.5000	0.124313	0.542001	0.003248	-0.009405
1.0000	0.222880	0.135792	0.006500	-0.037625
1.5000	0.335900	0.036877	0.009760	-0.084683

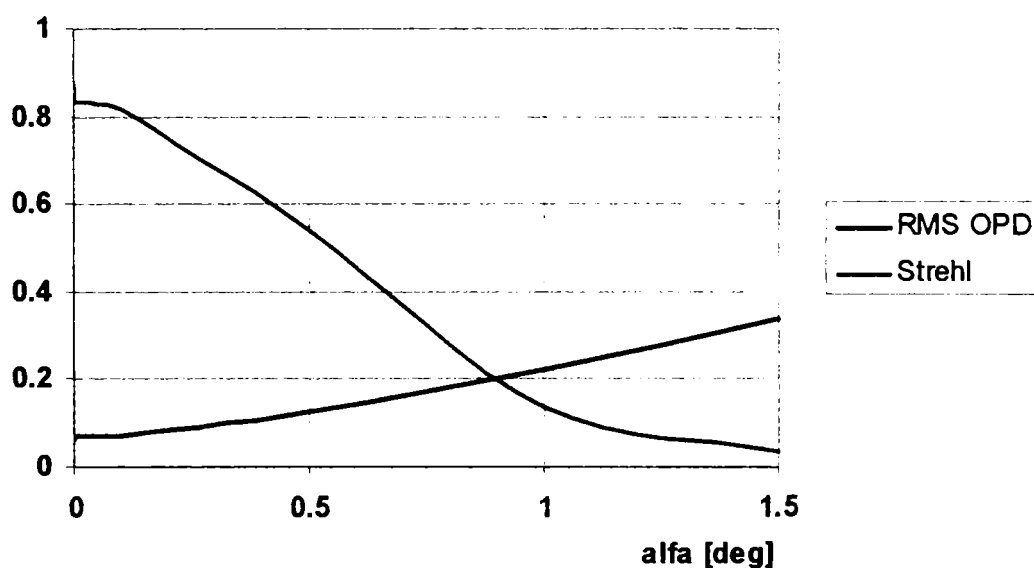


Fig.3.16. Variația parametrilor de calitate RMS OPD și Strehl funcție de înclinarea α_1

Tabelul 3.10

α_{y2} [°]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	$\Delta x_{F'}$ [mm]	$\Delta z_{F'}$ [mm]
0.0000	0.060045	0.874257	0.00	0.00
0.0003	0.068246	0.833714	4.1213e-06	-8.1128e-09
0.0010	0.068250	0.833473	1.3738e-05	-9.0152e-08
0.0020	0.068263	0.833499	2.7475e-05	-3.6061e-07
0.0200	0.069971	0.825592	0.000275	-3.6061e-05
0.0500	0.078413	0.786281	0.000687	-0.000225
0.1000	0.103069	0.664472	0.001374	-0.000902
0.2000	0.168931	0.372819	0.002748	-0.003606
0.5000	0.393272	0.117009	0.006872	-0.022541

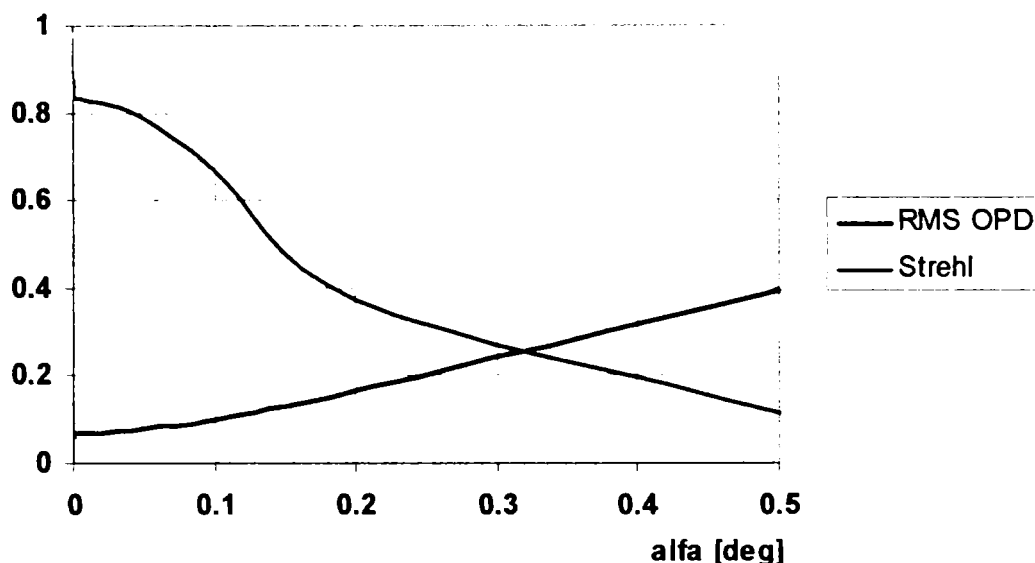


Fig.3.17. Variația parametrilor de calitate RMS OPD și Strehl funcție de înclinarea α_2

Tabelul 3.11

α_{y3} [°]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	Δx_F [mm]	Δz_F [mm]
0.0000	0.060045	0.874257	0.00	0.00
0.0003	0.068247	0.833661	7.7777e-06	-1.1130e-08
0.0010	0.068264	0.833295	2.5926e-05	-1.2368e-07
0.0020	0.068318	0.833341	5.1851e-05	-4.9472e-07
0.0200	0.075185	0.801492	0.000519	-4.9472e-05
0.0500	0.104299	0.657826	0.001296	-0.000309
0.1000	0.171881	0.363112	0.002593	-0.001237
0.2000	0.322858	0.154513	0.005186	-0.004947

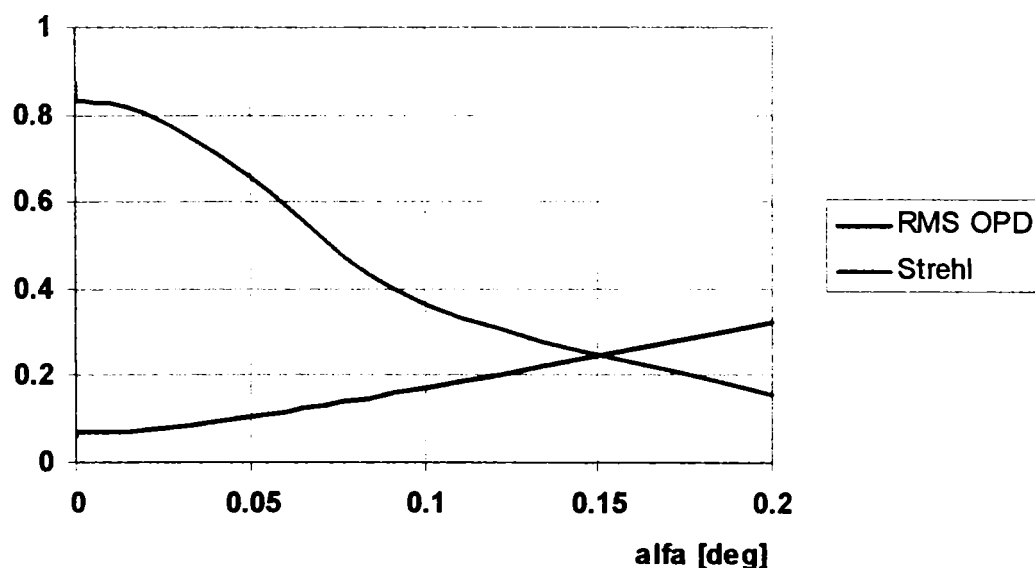


Fig.3.18. Variația parametrilor de calitate RMS OPD și Strehl funcție de înclinarea α_3

Urmărind rezultatele simulării erorilor de poziție a dioptrilor, echivalente cu erori de

montaj la lipirea componentelor sau fixarea în montură, se pot formula câteva concluzii:

- erorile de montaj nu afectează puterea sistemului optic ci numai poziția focarului, care se deplasează în afara axei optice, cu abateri axiale și radiale care, funcție de mărimea erorii, pot atinge valori de ordinul zecimilor de milimetru
- erorile de montaj afectează în mare măsură calitatea imaginii, care este sensibilă cu precădere la înclinarea dioptrilor
- descentrările individuale, singulare, sunt admisibile la nivelul sutimilor de milimetru, valorile fiind în descreștere în raport cu numărul de ordine al dioptrului
- înclinarea dioptrului, respectiv poziția centrului sferei din care provine suprafața în afara axei optice, induce degradări intense și rapide ale calității imaginii; poziția dioptrului afectat de înclinare este foarte importantă: se observă ca unghiul maxim admis pentru înclinarea celor trei dioptri (pentru păstrarea calității impuse) scade cu un ordin de mărime de la prima până la ultima suprafață ($\alpha_1=0.05^\circ$, $\alpha_2=0.02^\circ$, $\alpha_3=0.002^\circ$, ceea ce în unități mai sugestive înseamnă 3 minute, 1.2 minute și respectiv 7.2 secunde).

3.1.4. Analiza influenței cumulate a erorilor de execuție și montaj

Se urmărește evaluarea efectelor cumulate ale tuturor erorilor care intervin în procesul de fabricație, de la faza de concepție până la produsul finit.

Se pot face următoarele observații cu caracter de principii:

- abaterile dimensionale au efecte asupra puterii sistemului optic
- abaterea de la distanța focală nominală este o sumă ponderată și algebrică a efectelor abaterilor dimensionale
- determinarea analitică a unei astfel de funcții care să descrie variația abaterii distanței focale în raport cu abaterile dimensionale ale razelor și grosimilor este dificil de scris în formă generalizată chiar pentru un sistem simplu; se pot face particularizări pentru fiecare variabilă considerată separat, așa cum s-a făcut în paragrafele anterioare, dar rezultatele au un caracter pur informativ și calitativ. Este de așteptat ca toate erorile să se manifeste, dar la valori și cu semne aleatoare într-un domeniu care poate fi impus. Ca rezultat, măsurarea distanței focale a unui lot de fabricație se va înscrie în modelul cunoscut al repartiției frecvențelor după o regulă normată, gaussiană
- cu aceste observații se consideră oportun și acoperitor un studiu inițial al influenței abaterilor dimensionale la valorile lor maxime (la limita la care individual nu afectau calitatea imaginii); dacă rezultă ca efect cumulat o abatere superioară celei admise pentru distanța focală se trece la restrângerea graduală a toleranțelor individuale

- abaterile dimensionale au efecte minime asupra parametrilor de calitate a imaginii, efecte care se manifestă datorită defocusării determinate de abaterea de la distanța focală nominală
- calitatea imaginii este afectată mai ales de erorile de montaj; pentru studiul efectului cumulat al acestora se inițiază analiza tot cu valorile maxime ale abaterilor individuale care păstrau categoria de calitate a sistemului.

Utilizând rezultatele simulărilor erorilor individuale s-a procedat la modelarea dubletului pentru care s-au admis următoarele abateri dimensionale pozitive:

- $\Delta r_1 = +2\%$
- $\Delta r_2 = +0.5\%$
- $\Delta r_3 = +0.5\%$
- $\Delta d_{1,2} = +20\%$

S-au obținut următoarele rezultate (tab. 3.12):

Tabelul 3.12

	f' [mm]	$\Delta f'$ [%]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	Δz [mm] (defocusare)
sistem ideal	97.821234	0.0	0.060045	0.874257	0.00
sistem afectat de erori	98.998630	1.2	0.068848	0.824384	0.030320

Se observă că sistemul și-a păstrat calitatea imaginii, cu condiția corecției prin defocusare, care de altfel are o valoarea foarte scăzută. Modificarea abscisei planului imagine se datorează abaterii distanței focale. Valoarea acesteia poate fi admisă, mai ales având în vedere că s-a simulat o abatere a grosimilor care, practic, este mult inferioară.

Erorilor de execuție li s-au adăugat și cele de montaj, la valorile maxime admise ca influențe individuale:

- $\Delta y_2 = 0.1$
- $\Delta y_3 = 0.01$
- $\Delta \alpha_1 = 0.05^\circ$
- $\Delta \alpha_2 = 0.02^\circ$
- $\Delta \alpha_3 = 0.002^\circ$

Prin simulare s-au obținut următoarele rezultate (tab.3.13):

Tabelul 3.13

	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	Δx [mm]	Δy [mm]	Δz [mm]
sistem ideal	0.060045	0.874257	0.00	0.00	0.00
sistem afectat de erori	0.079754	0.807378	0.000659	-3.5782e-05	0.030320

În figura 3.19 este redată foaia de date a sistemului modelat cu erori maxime pozitive de execuție și montaj.

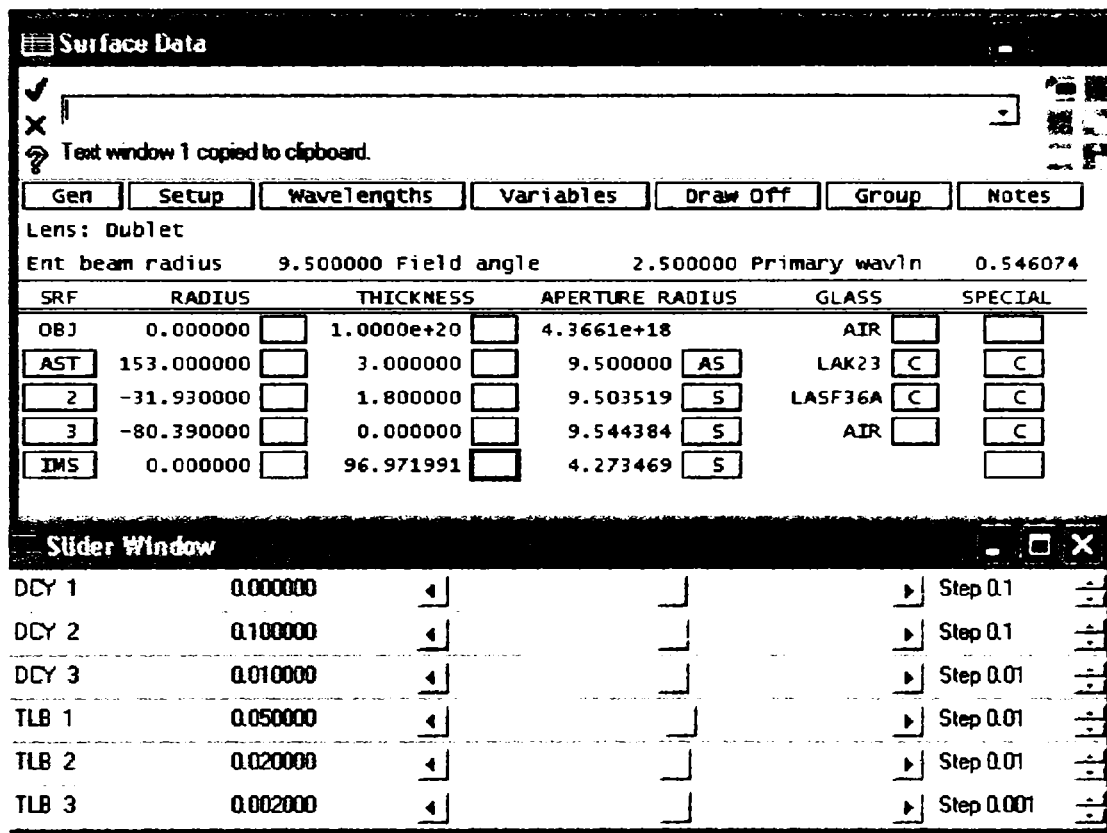


Fig.3.19. Foaia de date a sistemului cu erori pozitive maxime de execuție și montaj

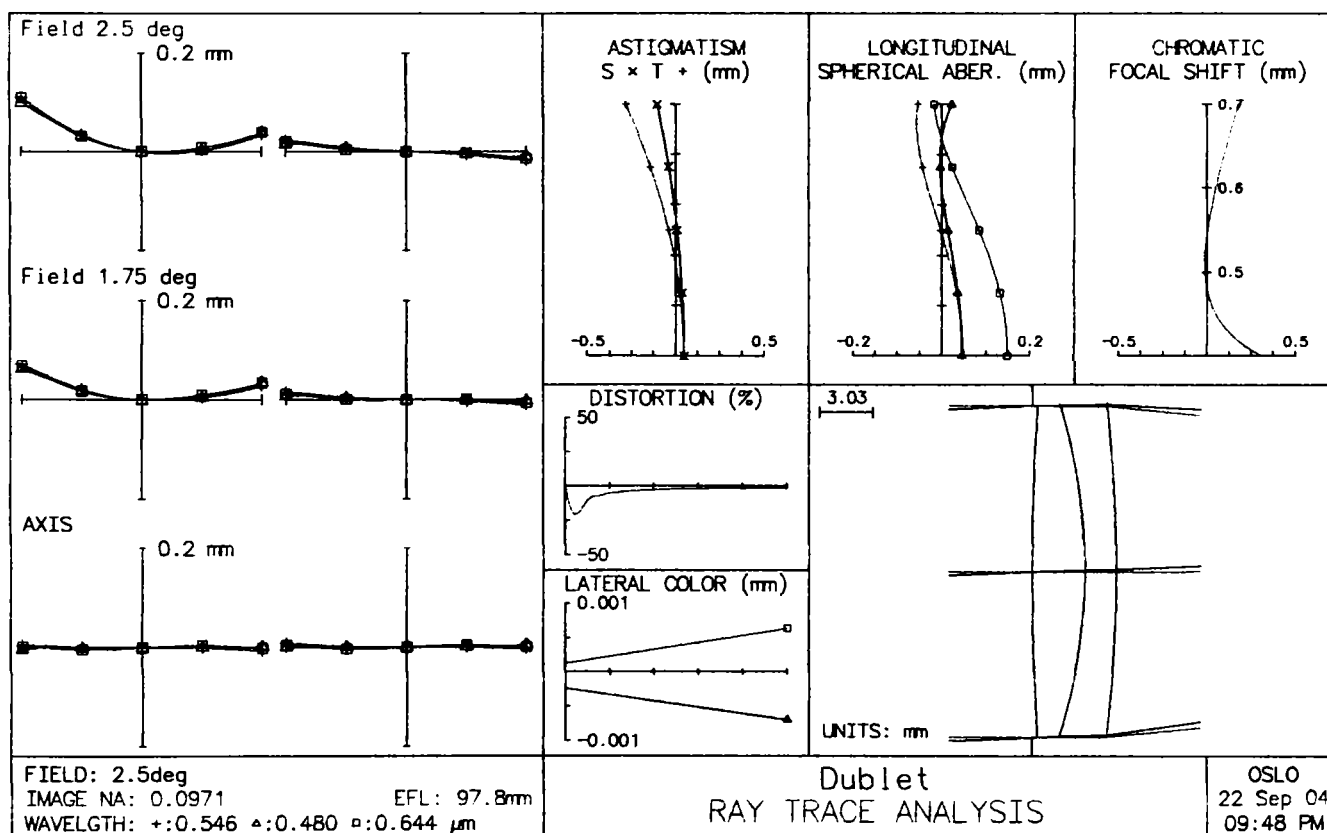


Fig.3.20. Aberațiile geometrice și cromatice ale sistemului afectat de erori

În figurile 3.20...3.24 este analizată calitatea imaginii sistemului afectat de erori.

Aberațiile geometrice axiale și transversale cresc fără a depăși însă valorile admise prin criteriul Rayleigh. Cele cromatice, în special cromatismul lateral diferă mult de cel al sistemului ideal. Distribuția spectrală în planul imagine este bine pusă în evidență de diagrama spot (fig.3.22 și 3.23).

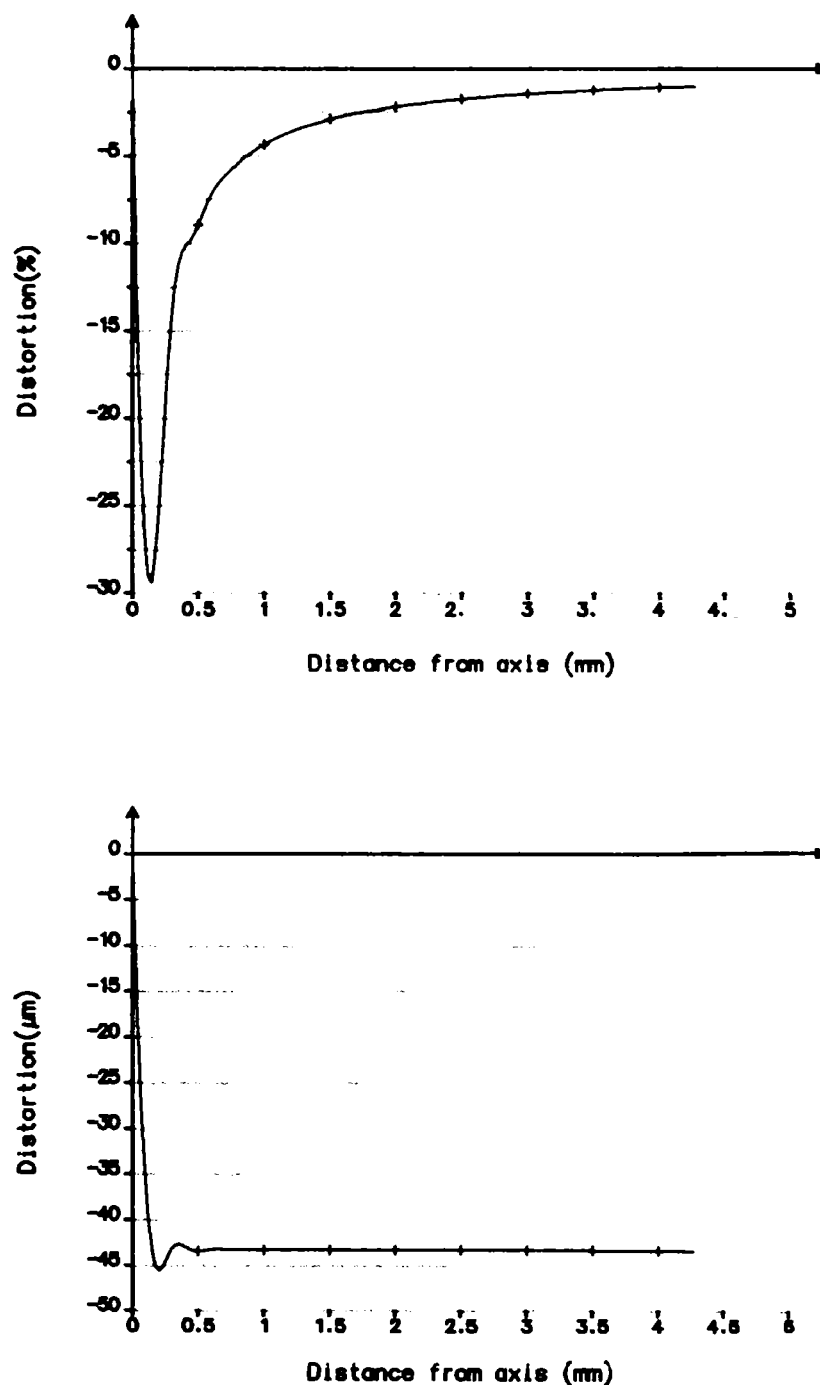


Fig.3.21. Distorsiunea procentuală și în valori absolute în raport cu apertura, cauzată de erorile de poziție ale dioptrilor

Descentrările și înclinările dioptrilor sistemului produc o distorsiune a imaginii în vecinătatea axei optice. Valoarea distorsiunii, după cum rezultă și din figura 3.20 este redusă și se atenuază rapid pe înălțime.

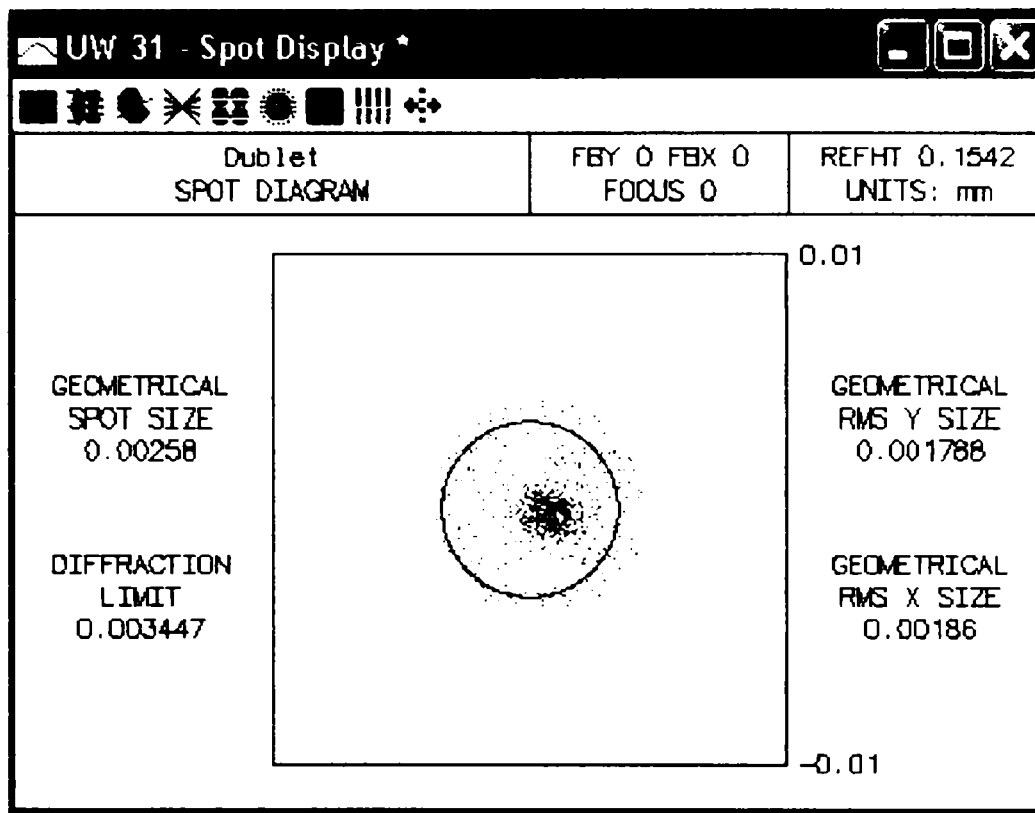


Fig.3.22. Diagrama spot pentru un punct obiect axial

Se observă că distribuția reală a punctelor imagine descriu o figură cu extindere care depășește cercul Airy (reprezentat cu negru) și este descentrată față de acesta.

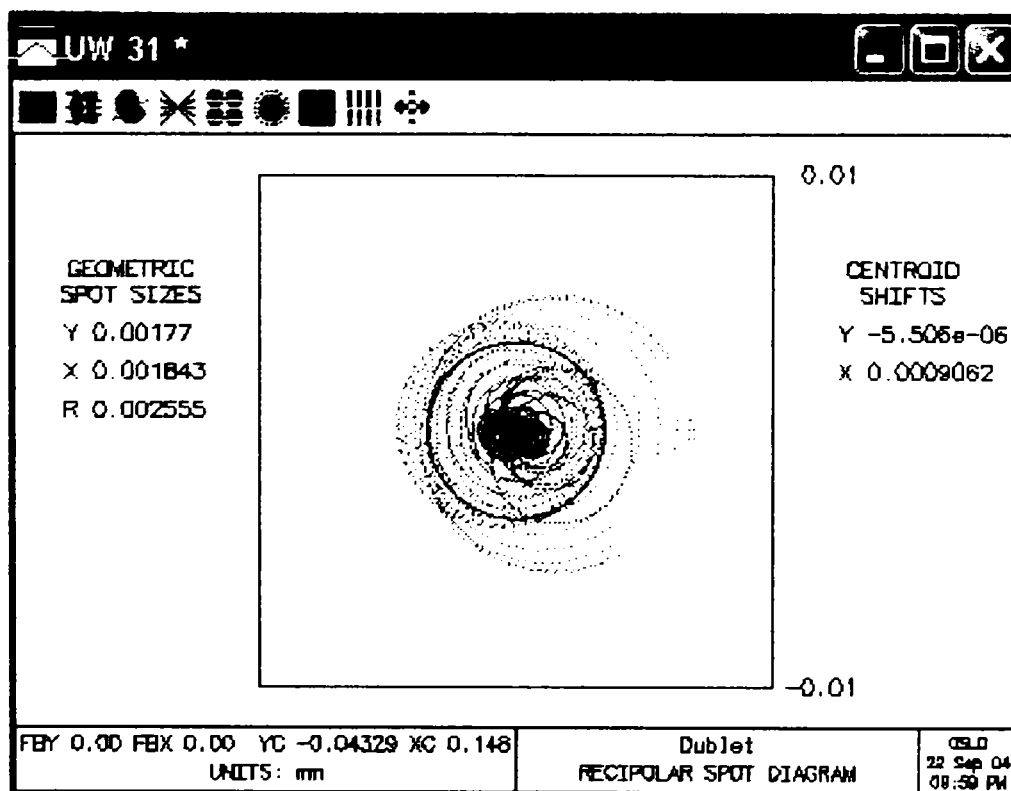


Fig.3.23. Diagrama spot polară pentru un punct obiect axial

Diagrama este trasată utilizând 20 de cercuri concentrice ale pupilei de intrare și pune în evidență accentuarea aberațiilor cromatice și asimetria figurii generală a figurii de difracție în raport cu cercul Airy.

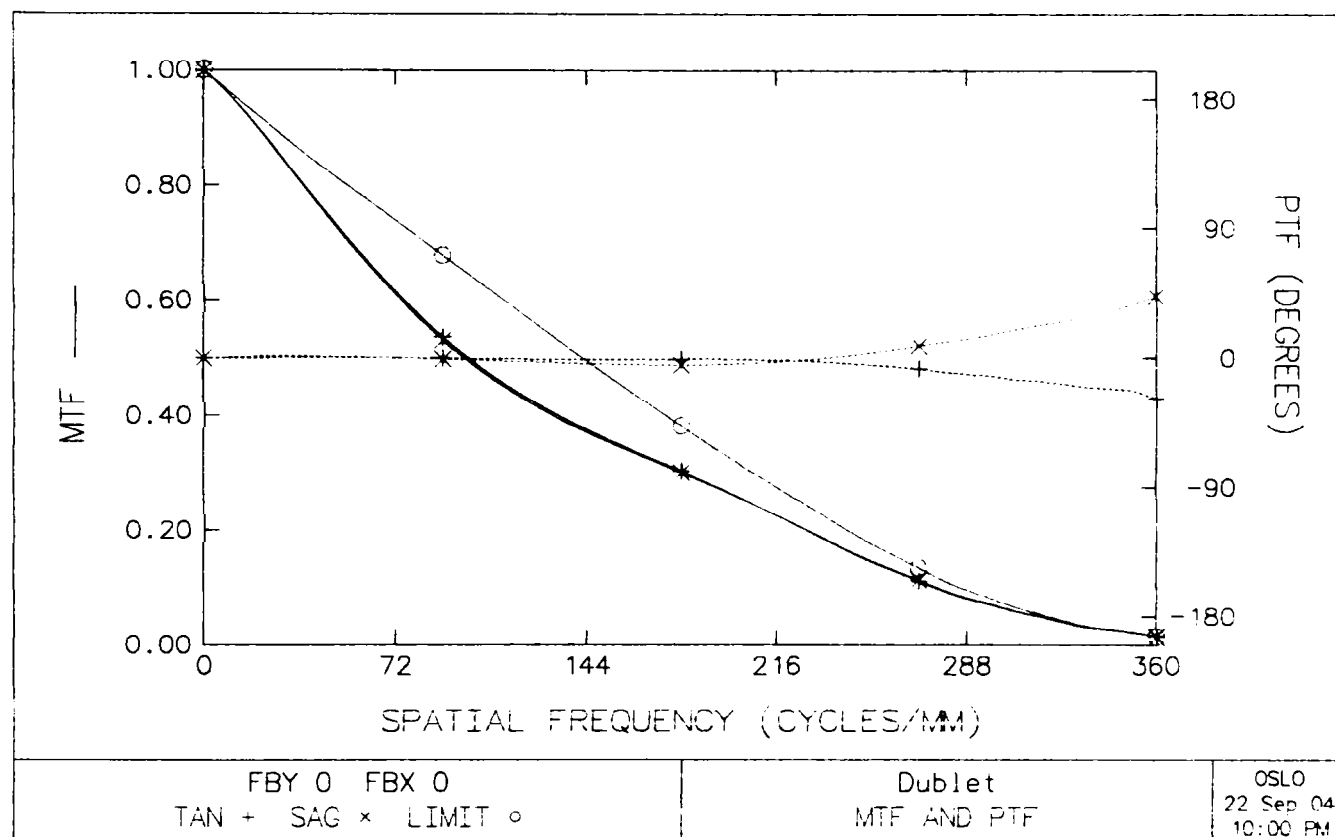


Fig.3.24. Funcția optică de transfer și de modulație a sistemului afectat de erori

Deși funcția de transfer de modulație nu diferă semnificativ de cea ideală, deci iluminarea în planul imagine rămâne corespunzătoare estimării din faza de proiectare, se observă o modificare importantă a funcției de transfer de fază în sensul scăderii rezoluției până la aproximativ jumătate din frecvența limită. Pentru frecvențe mai mari apar inversări de contrast între planul tangențial și sagital, ceea ce are ca efect scăderea clarității la nivelul detaliilor corespunzătoare frecvențelor mari.

Cu toate comentariile privind scăderea calității imaginii se poate aprecia că sistemul afectat de erori a rămas în clasa de calitate estimată de proiectant.

Se prezintă în continuare o analiză similară conținând o simulare a erorilor maxime admise ca individuale, dar de sens negativ:

- $\Delta r_1 = -2\%$
- $\Delta r_2 = -0.5\%$
- $\Delta r_3 = -0.5\%$
- $\Delta d_{1,2} = -20\%$

S-au obținut următoarele rezultate (tab. 3.14):

Tabelul 3.14

	f' [mm]	$\Delta f'$ [%]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	Δz [mm] (defocusare)
sistem ideal	97.821234	0.0	0.060045	0.874257	0.00
sistem afectat de erori	96.614080	-1.2	0.068761	0.838518	-1.085734

Se observă că sistemul și-a păstrat calitatea imaginii, cu condiția corecției prin defocusare, care are o valoarea relativ ridicată, dar poate fi compensată prin defocusare. Modificarea abscisei planului imagine se datorează abaterii distanței focale. Valoarea acesteia poate fi admisă, mai ales având în vedere că s-a simulat o abatere a grosimilor care, practic, este mult inferioară.

Erorilor de execuție li s-au adăugat și cele de montaj, la valorile maxime admise ca influențe individuale:

- $\Delta y_2 = 0.1$
- $\Delta y_3 = 0.01$
- $\Delta \alpha_1 = 0.05^\circ$
- $\Delta \alpha_2 = 0.02^\circ$
- $\Delta \alpha_3 = 0.002^\circ$

Prin simulare s-au obținut următoarele rezultate (tab.3.15):

Tabelul 3.15

	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	Δx [mm]	Δy [mm]	Δz [mm]
sistem ideal	0.060045	0.874257	0.00	0.00	0.00
sistem afectat de erori	0.075586	0.806353	0.000660	-9.1050e-05	1.085734

În figura 3.25 este redată foaia de date a sistemului modelat cu erori maxime negative de execuție și montaj.

Figurile următoare (3.26...3.30) ilustrează o analiză a calității sistemului afectat de erori similară celei din cazul prezentat anterior.

Urmărind efectele erorilor, cu precădere a celor de descentrare și înclinare se pot face observații similare în ceea ce privește degradarea parametrilor de calitate a imaginii. Totuși, acești indicatori de calitate, în ambele cazuri, își păstrează situația în limitele impuse de criteriul Rayleigh, ceea ce conduce la următoarele concluzii parțiale:

- pentru un sistem simplu, cum a fost cel analizat și care conține numai trei dioptri, este suficientă stabilirea abaterii maxime admise a fiecărui parametru dimensional sau de poziție, pentru ca sistemul real să se încadreze în aceeași categorie de calitate cu sistemul calculat pe baza valorilor nominale.
- concluzii cu caracter general și recomandări practice cuprinzătoare se pot face numai

după un studiu care să vizeze și sisteme mai complexe, la care efectul cumulativ este mai pregnant.

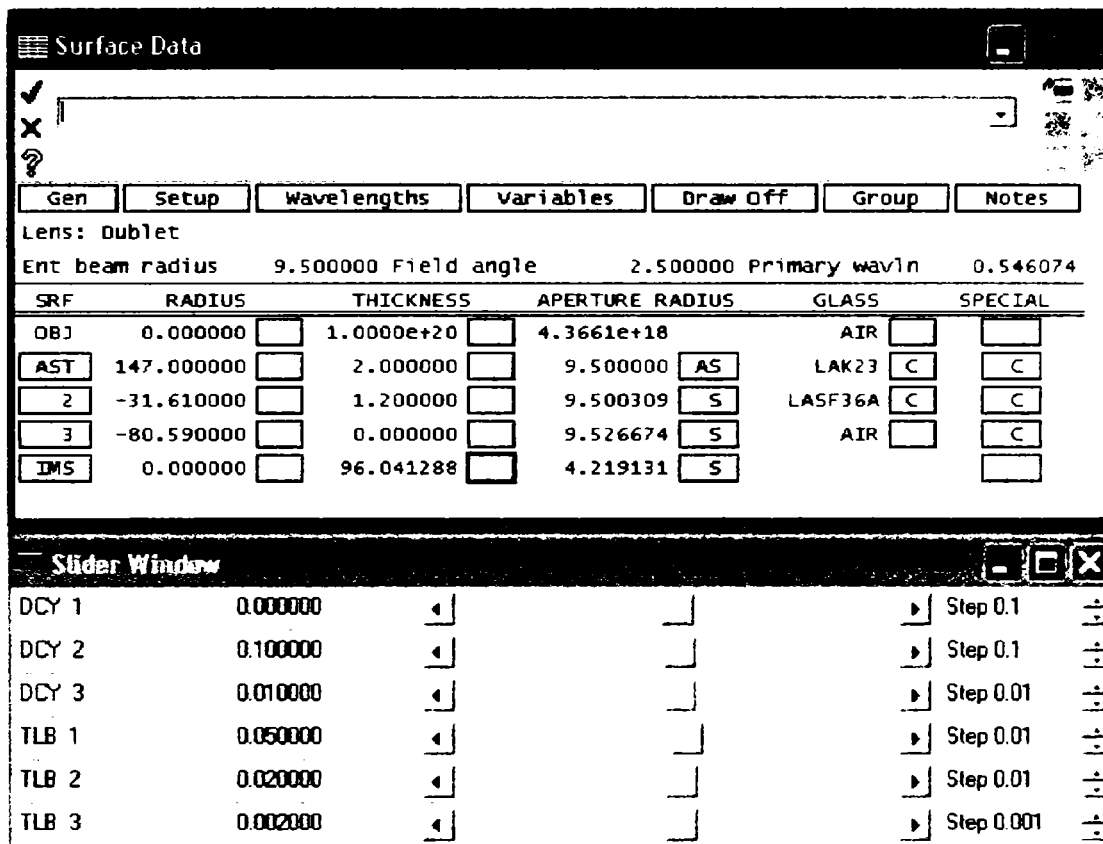


Fig.3.25. Foaia de date a sistemului afectat de erori maxime negative

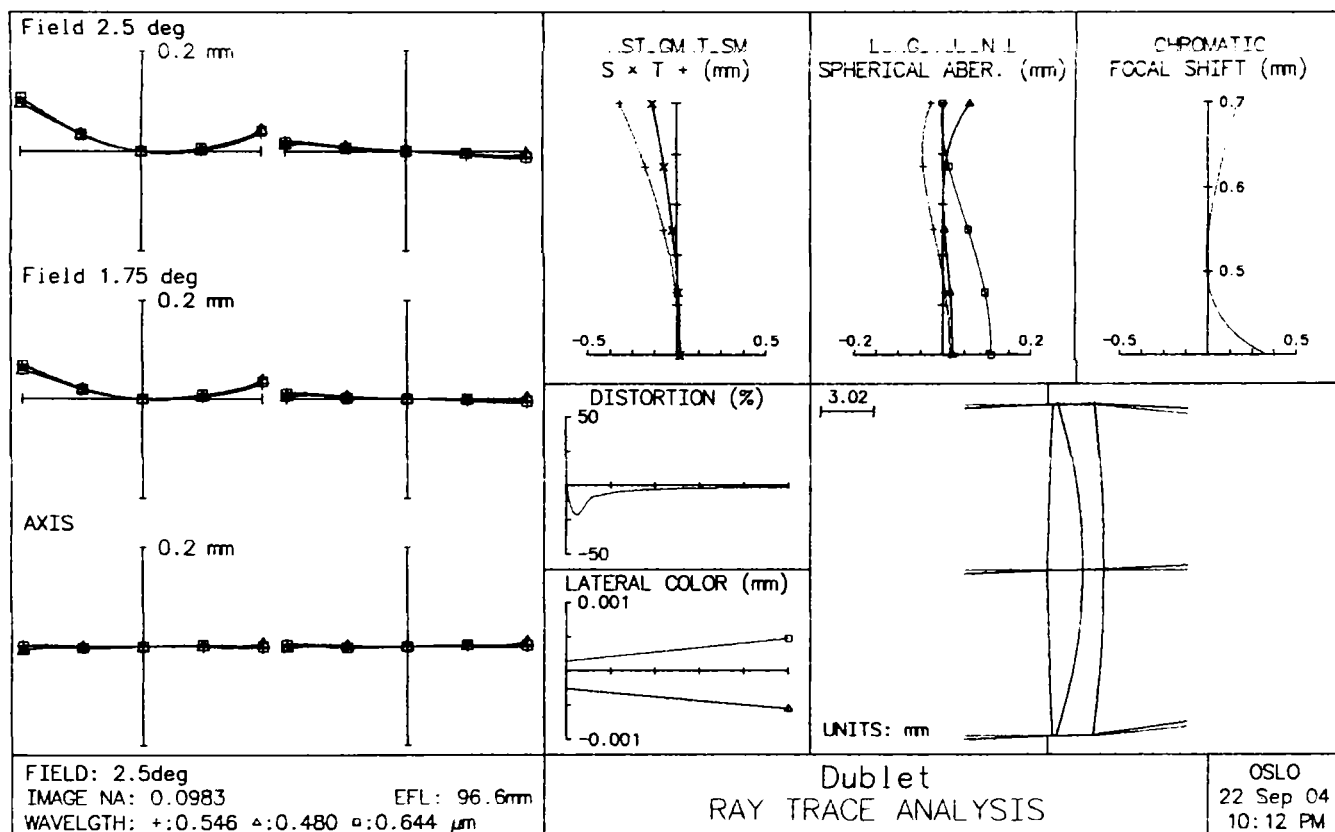


Fig.3.26. Aberațiile geometrice și cromatice ale sistemului afectat de erori

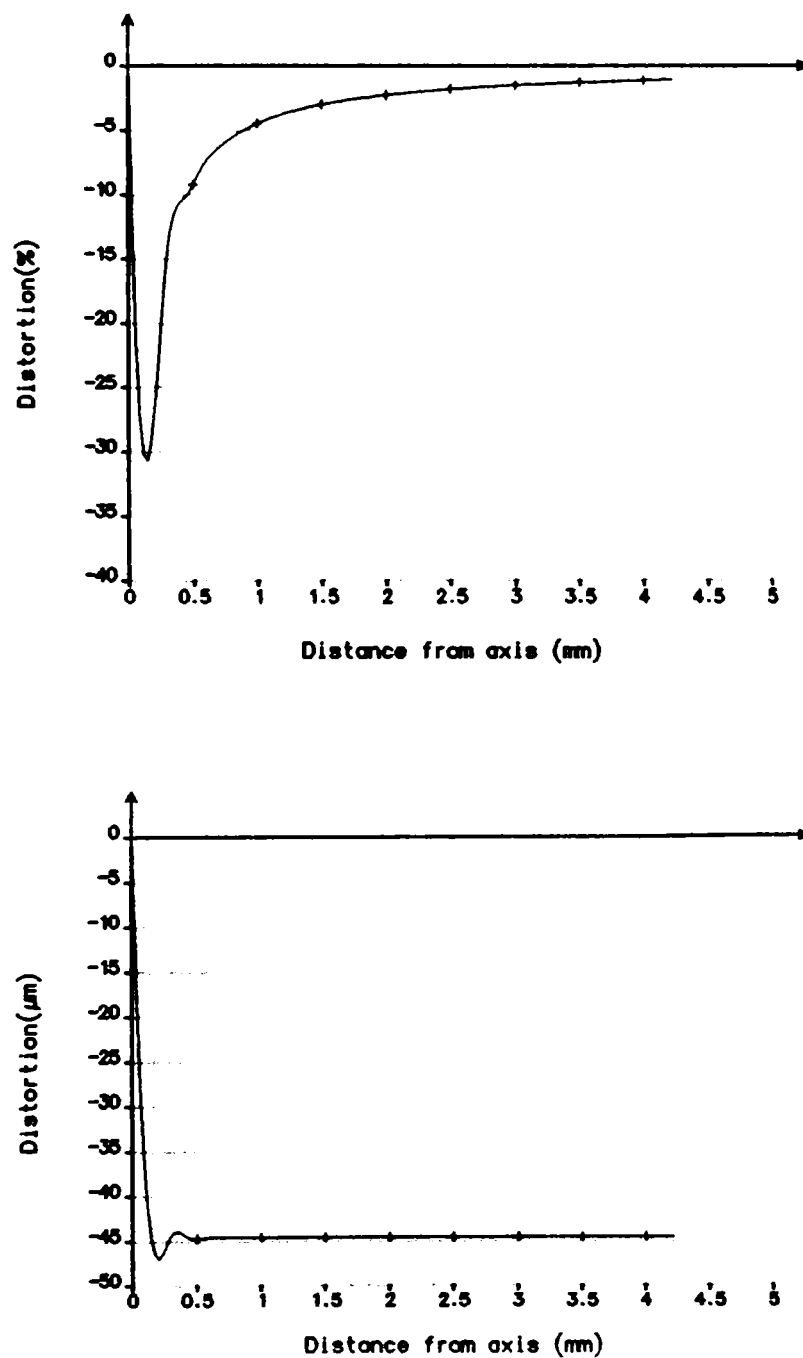


Fig.3.27. Distorsiunea procentuală și în valori absolute ale sistemului cu erori de execuție și montaj

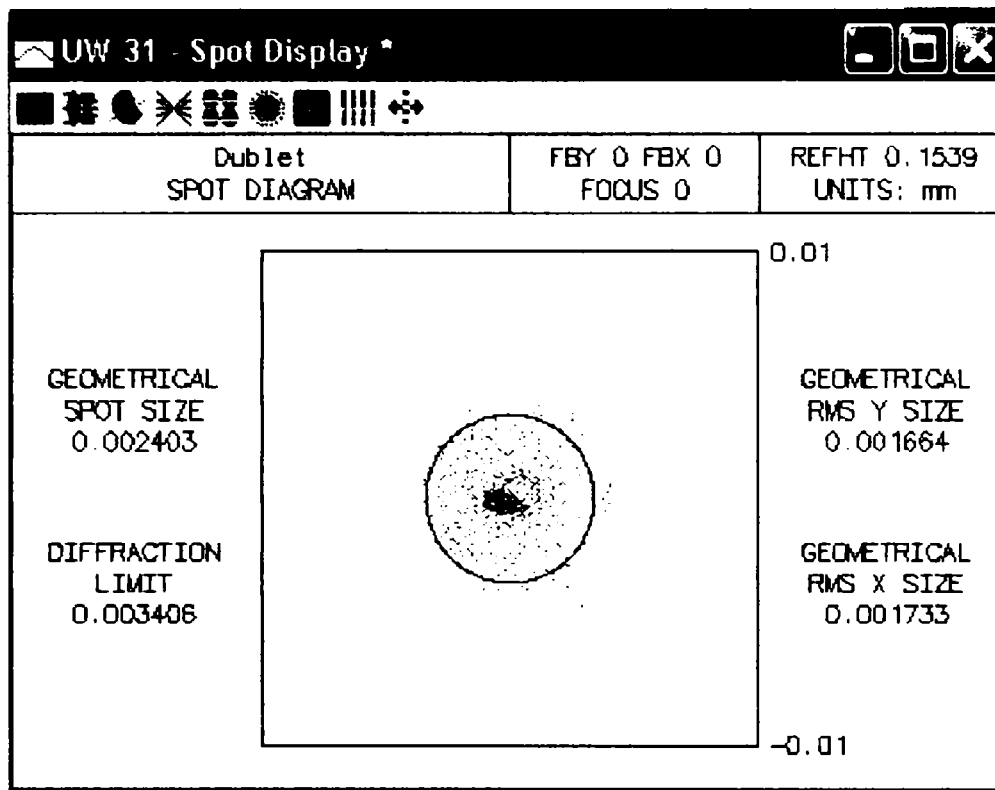


Fig.3.28. Diagrama spot a unui punct obiect axial

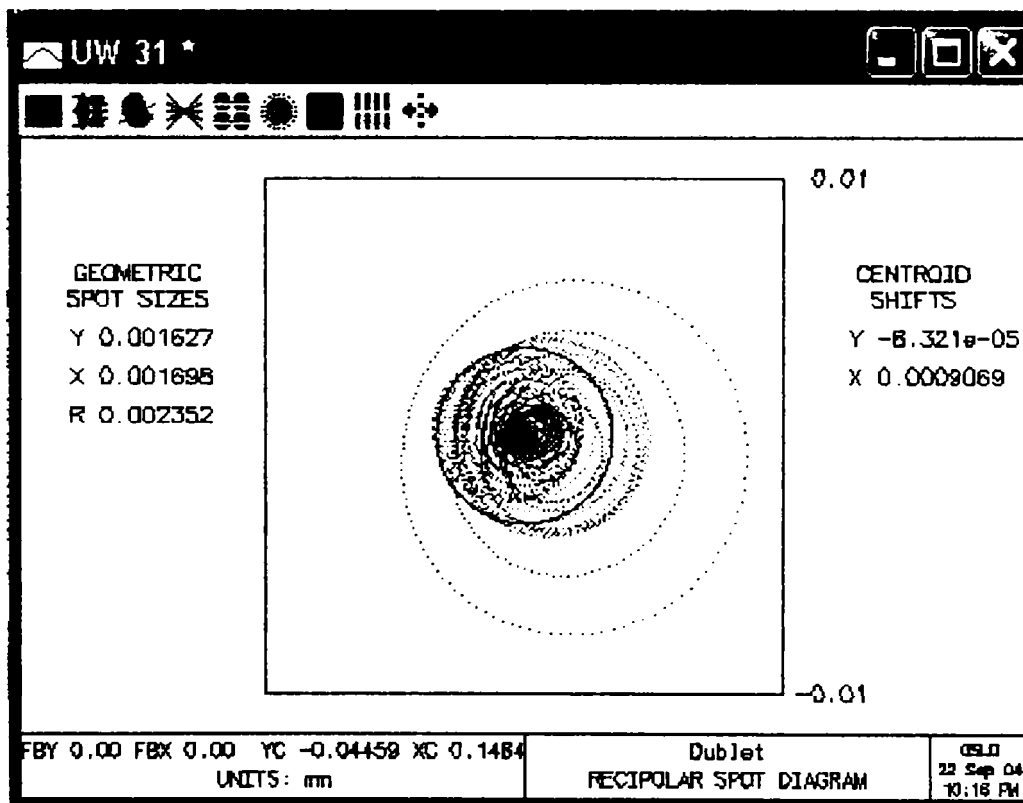


Fig. 3.29. Diagrama spot polară

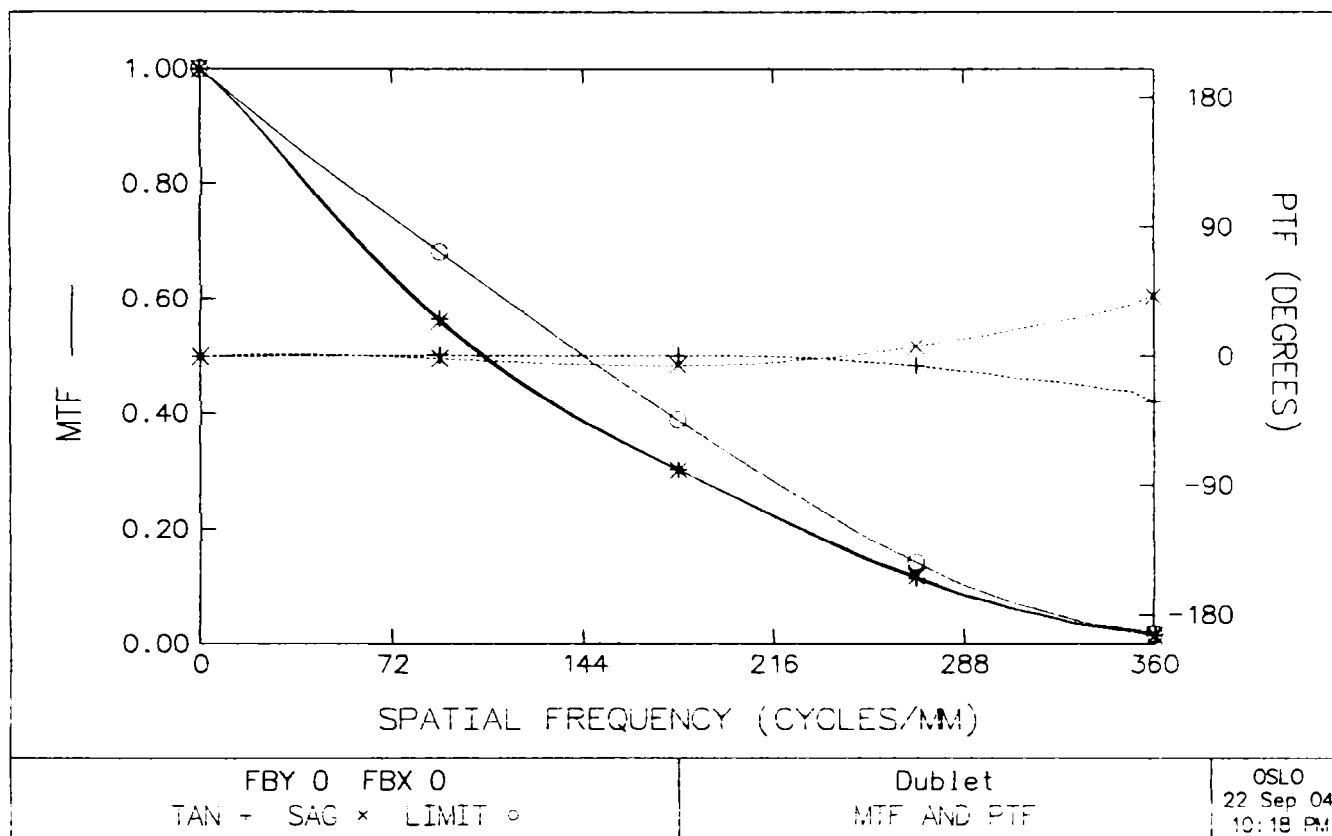


Fig.3.30. Funcția optică de transfer de modulație și de fază a sistemului afectat de erori de execuție și montaj

3.2. ANALIZA UNUI SUBANSAMBLU OPTIC COMPLEX

3.2.1. Caracteristicile sistemului ideal (fără erori de execuție și montaj)

În scopul analizei unui subansamblu complex s-a optat pentru un sistem optic format din șase dioptri. Acesta are o structură simetrică, obținută prin asocierea a două dublete identice celui analizat în paragrafele anterioare. Pentru optimizarea calității sistemului s-a procedat la asferizarea ultimului dioptru.

Geometria ansamblului simetric, caracterizată prin valorile razelor și grosimilor, sorturile de sticlă și caracteristicile de referință sunt redate în figura 3.31, în subsolul căreia a fost atașată caseta cu analiza frontului de undă. Sistemul a fost optimizat prin defocusare (se observă că valoarea de referință a frontifocalei este $s'_F = 46.275589$, iar abscisa optimă a planului imagine pentru care $RMS\ OPD=0.059688$ și $Strehl=0.890411$, necesită o defocusare $RSZ=0.015220$).

Figurile următoare (3.32...3.35) prezintă detaliat analiza calității sistemului. Rezultă că acesta, așa cum rezultă din proiectare, este de cea mai bună calitate.

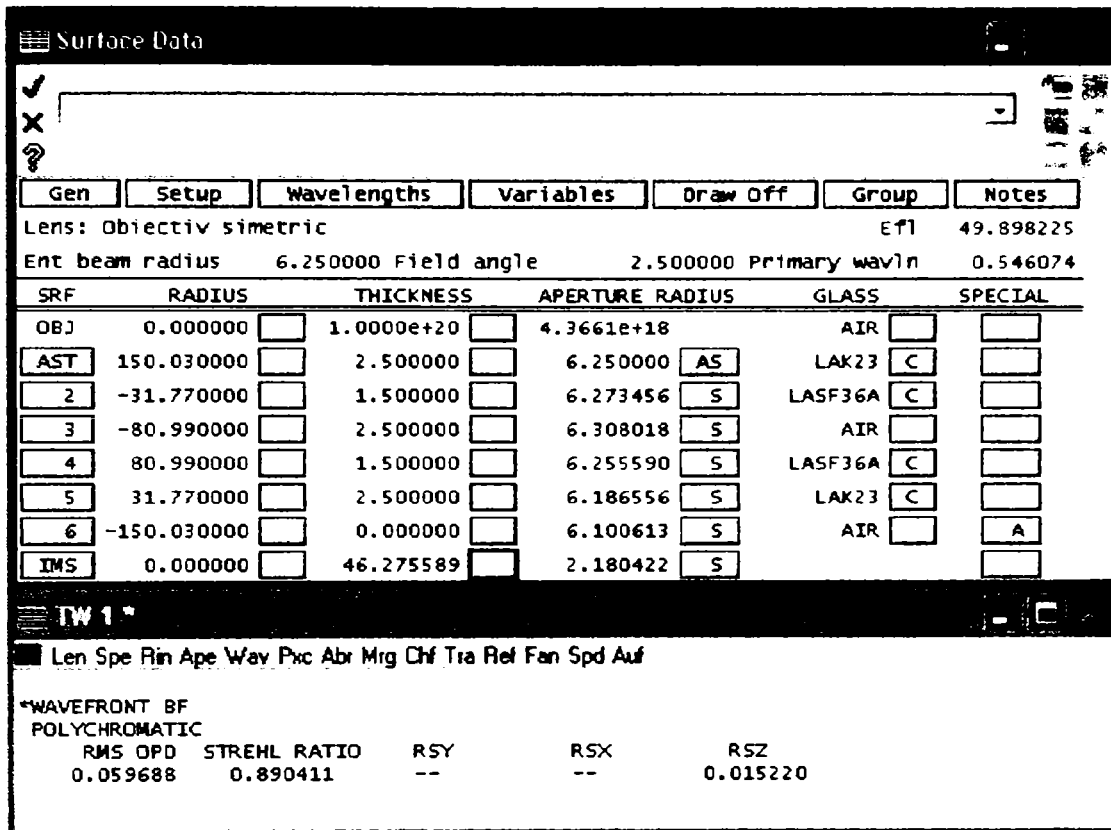


Fig.3.31. Foaia de date și analiza frontului de undă a sistemului simetric optimizat

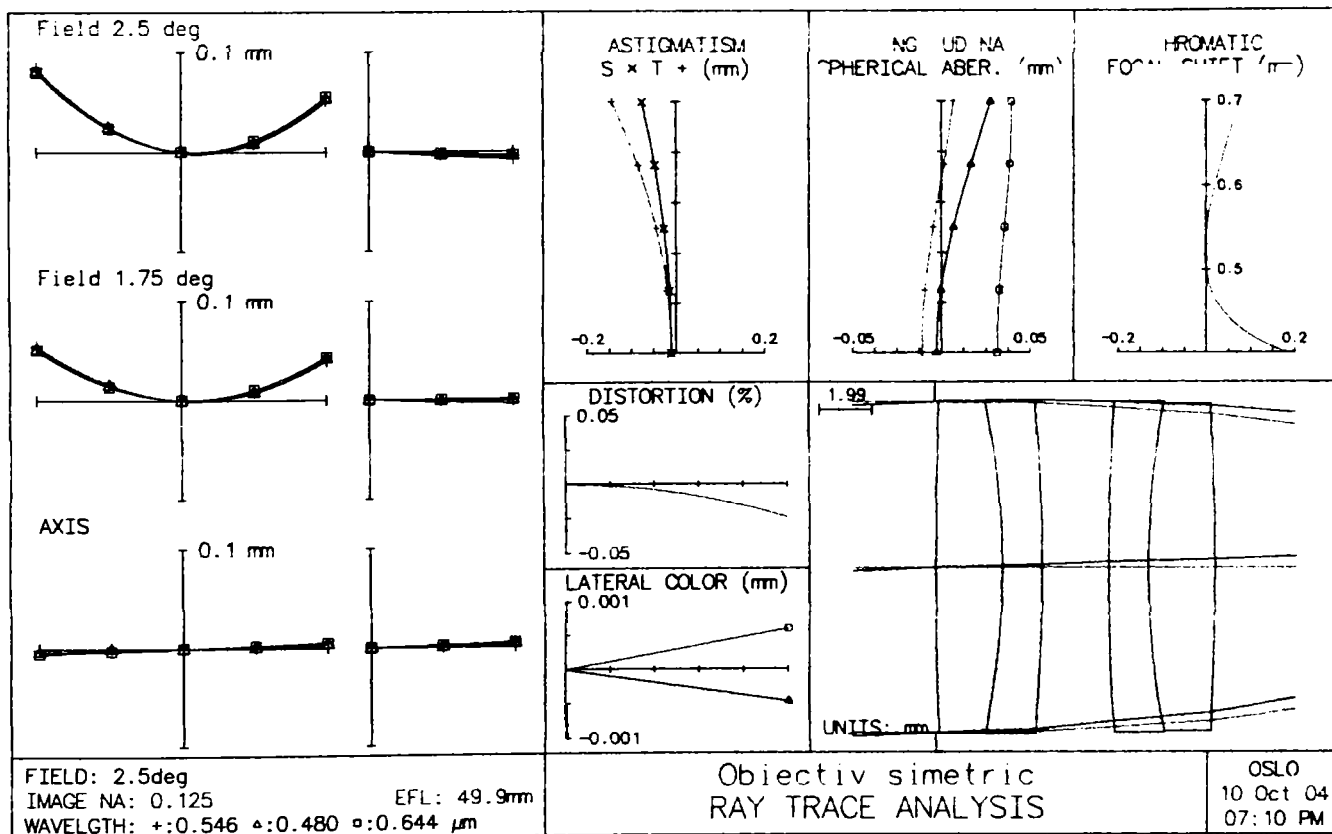


Fig.3.32. Aberațiile geometrice și cromatice ale sistemului simetric ideal

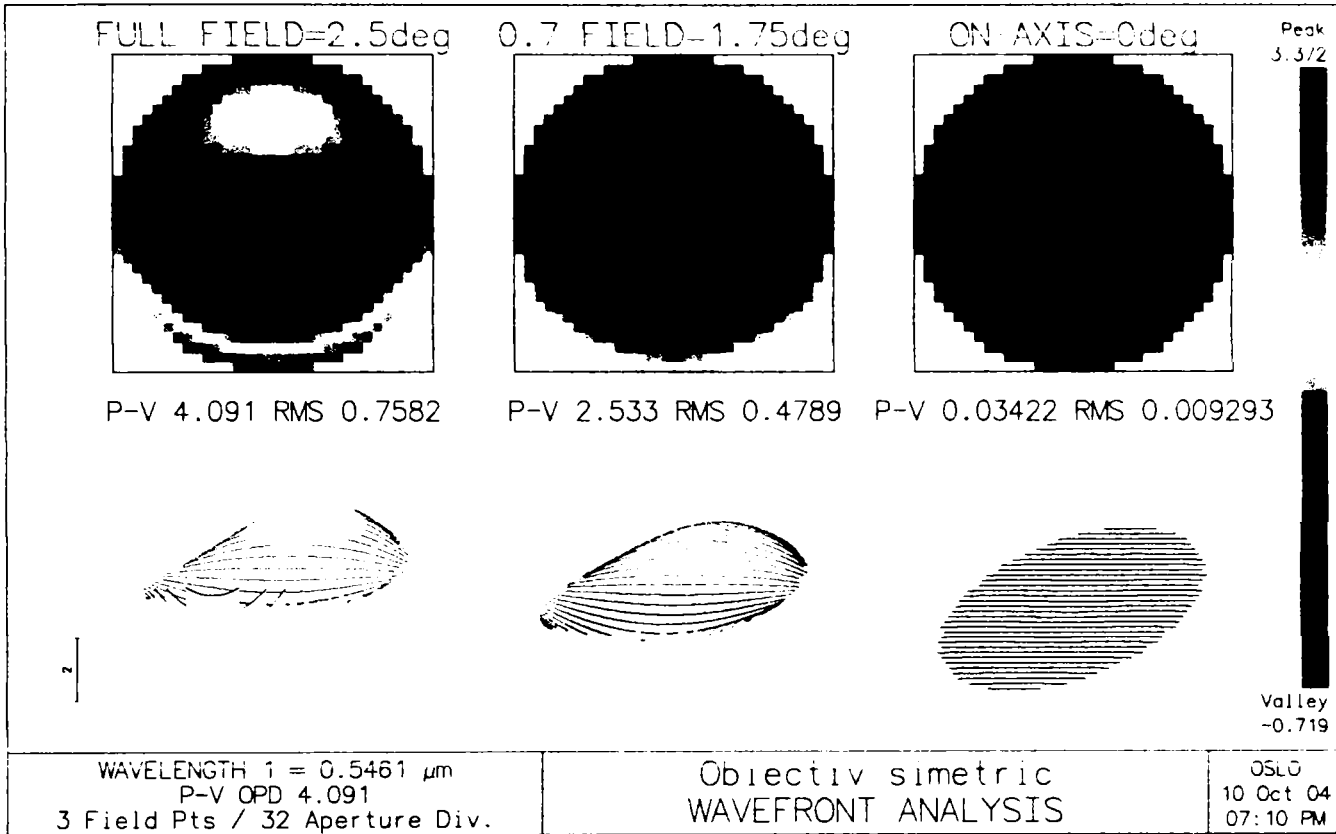


Fig.3.33. Analiza frontului de undă pentru sistemul simetric ideal

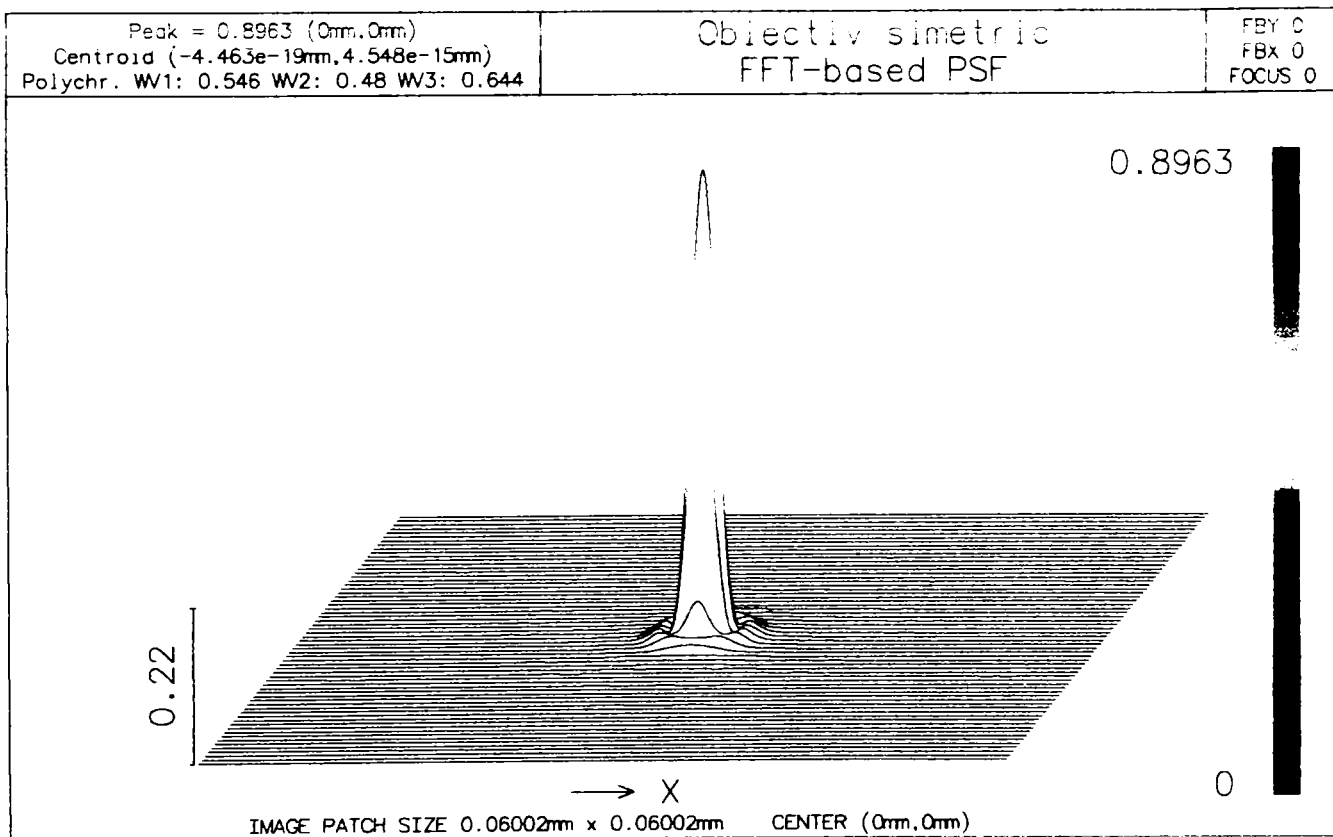


Fig.3.34. Funcția imagine a punctului pentru sistemul simetric ideal

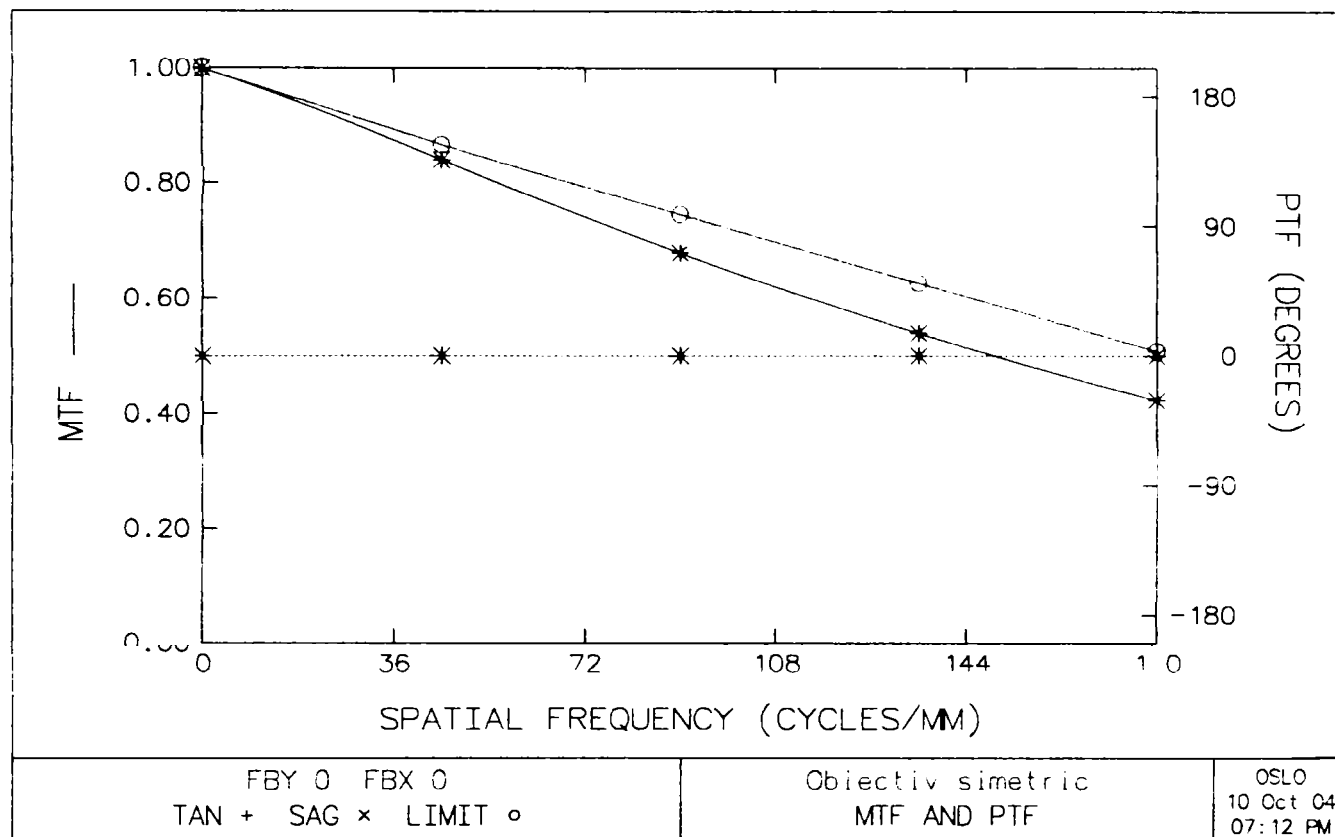


Fig.3.35. Funcția optică de transfer de modulație și de fază pentru sistemul simetric ideal

3.2.2. Influența erorilor de execuție

Analiza sistemului cu șase dioptri urmărește aceeași schemă logică practică pentru dubletul studiat anterior.

Simularea abaterilor dimensionale a condus la rezultatele numerice prezentate în tabelele 3.16...3.21. Datele cuprinse în aceste tabele au servit reprezentărilor grafice din figurile 3.36...3.41.

Tabelul 3.16

$r_1 = 150.03\text{mm}$

Δr [%]	r [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [%]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	N
-5.00	142.53	49.3603	-1.08	0.073709	0.891805	28
-1.50	147.78	49.7413	-0.31	0.061625	0.894085	8
-1.00	148.53	49.7941	-0.21	0.060896	0.892233	5
-0.50	149.28	49.8463	-0.10	0.061534	0.891356	3
-0.05	149.96	49.8934	-0.01	0.059742	0.890579	1
0.00	150.03	49.8982	0.00	0.059688	0.890895	0.0
0.05	150.11	49.9037	0.01	0.059634	0.890207	1
0.50	150.78	49.9496	0.10	0.0592361	0.887321	3
1.00	151.53	50.0007	0.21	0.058743	0.888725	7
1.50	152.28	50.0513	0.31	0.058391	0.887027	8
5.00	157.53	50.3951	1.00	0.061577	0.856486	28

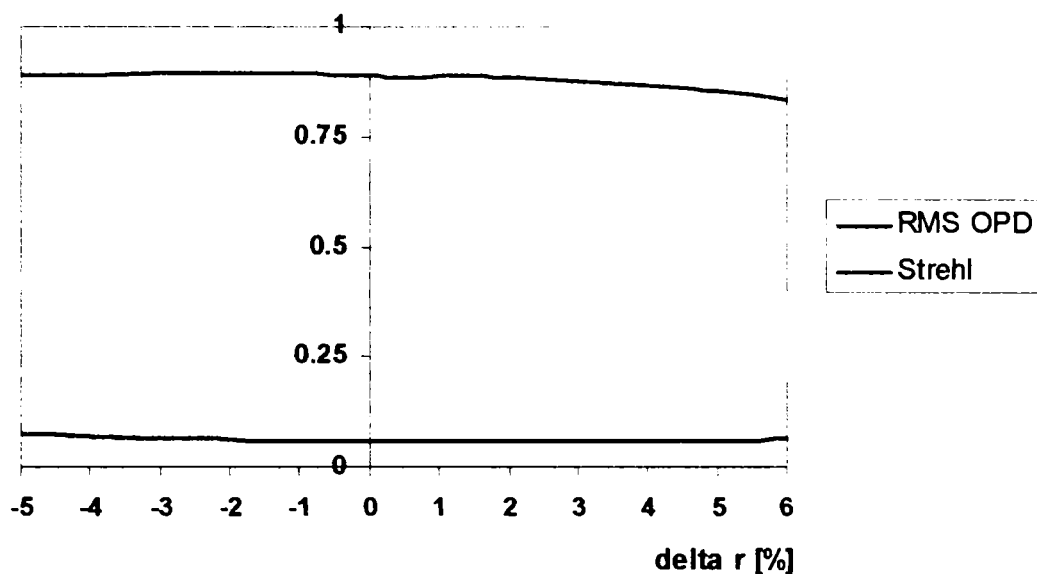


Fig. 3.36. Variația parametrilor RMS OPD și Strehl funcție de Δr_1

Tabelul 3.17

$r_2 = -31.77\text{mm}$

Δr [%]	r [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [%]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	N
-5.00	-30.18	50.4140	-1.03	0.090374	0.694137	-
-4.00	-30.49	50.3083	-0.82	0.075502	0.766349	-
-2.00	-31.13	50.0983	-0.40	0.057577	0.869757	180
-1.00	-31.45	49.9970	-0.20	0.056130	0.890023	26
-0.50	-31.61	49.9473	-0.10	0.058265	0.895730	10
-0.05	-31.75	49.9012	-0.01	0.059407	0.891273	2
0.00	-31.77	49.8982	0.00	0.059688	0.890895	0
0.05	-31.78	49.8952	0.01	0.059979	0.890427	2
0.50	-31.93	49.8407	0.12	0.062489	0.882650	10
1.00	-32.08	49.8048	0.19	0.067110	0.874718	26
2.00	-32.40	49.8167	0.16	0.077125	0.847791	-
4.00	-33.04	49.5285	0.74	0.101659	0.778507	-
5.00	-33.35	49.4433	0.91	0.115351	0.743315	-

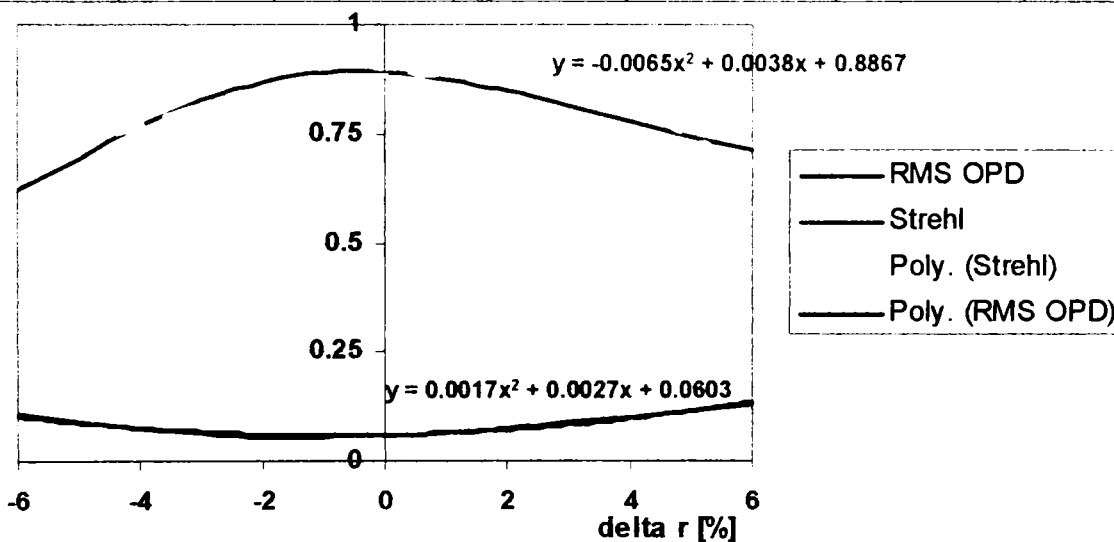


Fig. 3.37. Variația parametrilor RMS OPD și Strehl funcție de Δr_2

Tabelul 3.18

$r_3 = -80.99\text{mm}$

Δr [%]	r [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [%]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	N
-4.00	-77.75	48.9298	-1.94	0.128666	0.73148	-
-3.00	-78.56	49.1758	-1.45	0.096000	0.850937	-
-1.50	-79.77	49.5384	-0.72	0.069909	0.886413	15
-0.50	-80.58	49.7778	-0.24	0.063260	0.889690	5
-0.05	-80.94	49.8836	-0.03	0.059894	0.890911	1
0.00	-80.99	49.8982	0.00	0.059688	0.890895	0.00
0.05	-81.03	49.9100	0.02	0.059490	0.890796	1
0.50	-81.39	50.0150	0.23	0.058156	0.88463	5
2.00	-82.60	50.3645	0.93	0.061001	0.851462	15
3.00	-83.41	50.5954	1.40	0.074168	0.778233	-
4.00	-84.22	50.8240	1.86	0.098293	0.658329	-

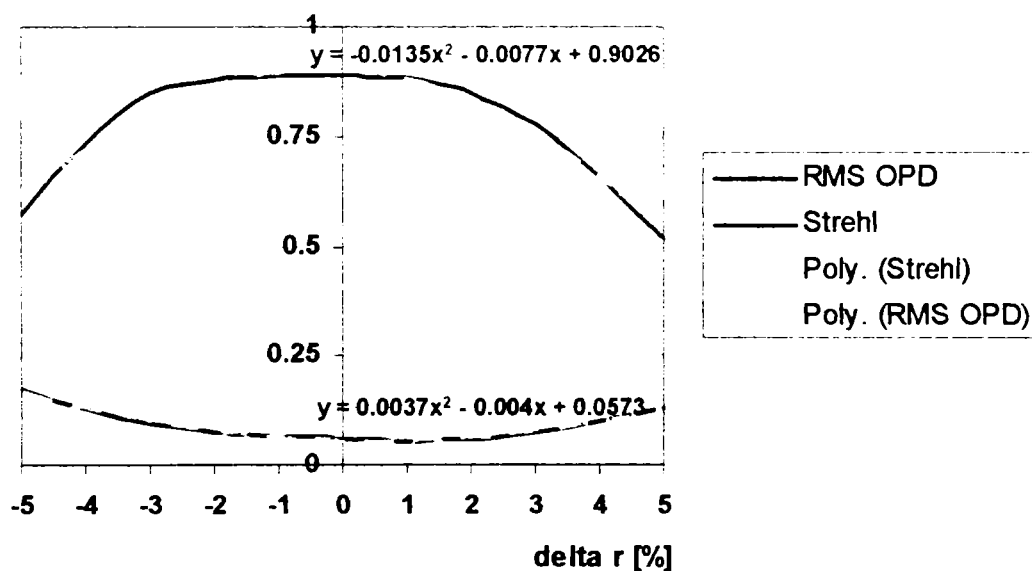


Fig.3.38. Variația parametrilor RMS OPD și Strehl funcție de Δr_3

Tabelul 3.19

$r_4 = 80.99\text{ mm}$

Δr [%]	r [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [%]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	N [-]
-4.00	77.75	48.9298	-1.94	0.117603	0.801853	-
-3.00	78.56	49.1758	-1.45	0.090701	0.862087	-
-2.00	79.37	49.4191	-0.96	0.074480	0.881039	15
-1.00	80.18	49.651	-0.50	0.065323	0.886608	10
-0.50	80.58	49.778	-0.24	0.062460	0.888423	5
0.00	80.99	49.8982	0.00	0.059688	0.890895	0.00
0.50	81.39	50.0149	0.23	0.058024	0.890156	5
1.00	81.79	50.1311	0.47	0.056309	0.889363	10
2.00	82.60	50.3645	0.93	0.057189	0.869595	15
3.00	83.41	50.5954	1.40	0.066231	0.815705	-
4.00	84.22	50.824	1.86	0.085477	0.716097	-
5.00	85.03	51.0502	2.31	0.114076	0.584002	-

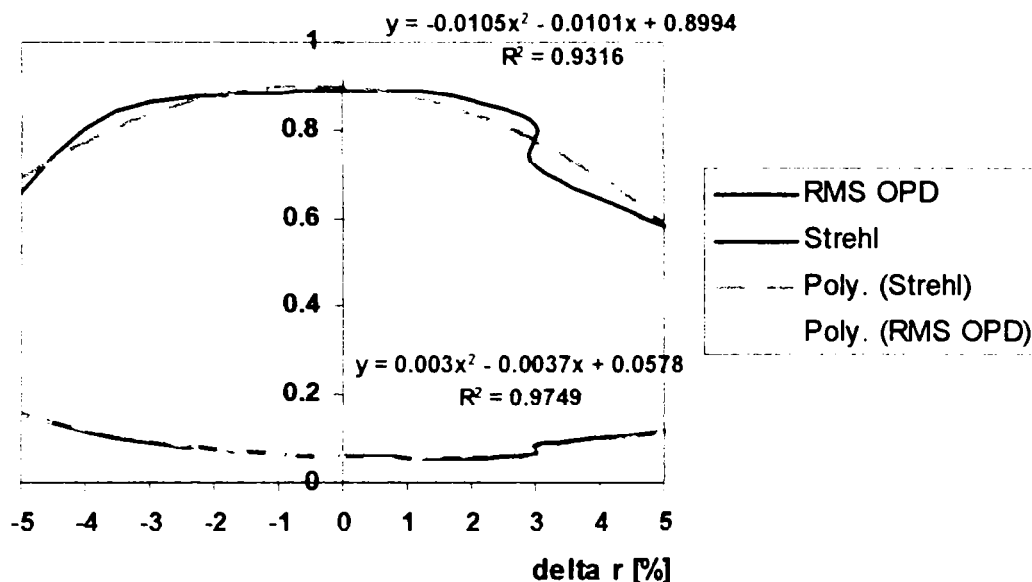


Fig.3.39. Variația parametrilor RMS OPD și Strehl funcție de Δr_4

Tabelul 3.20

$r_5 = 31.77 \text{ mm}$

Δr [%]	r [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [%]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	N [-]
-5.00	30.18	50.414	-1.03	0.074679	0.763201	-
-4.00	30.49	50.3083	-0.82	0.064291	0.819447	40
-1.00	31.45	49.997	-0.20	0.055302	0.895408	25
-0.50	31.61	49.9473	-0.10	0.057832	0.893265	13
0.00	31.77	49.8982	0.00	0.059688	0.890895	0.00
0.50	31.92	49.8527	0.09	0.063259	0.882367	13
1.00	32.08	49.8048	0.19	0.066584	0.875058	25
1.50	32.24	49.7573	0.28	0.070714	0.863659	-
2.00	32.40	49.7105	0.38	0.075192	0.851132	-
4.00	33.04	49.5285	0.74	0.095554	0.794477	-
5.00	33.35	49.4433	0.91	0.106785	0.766452	-

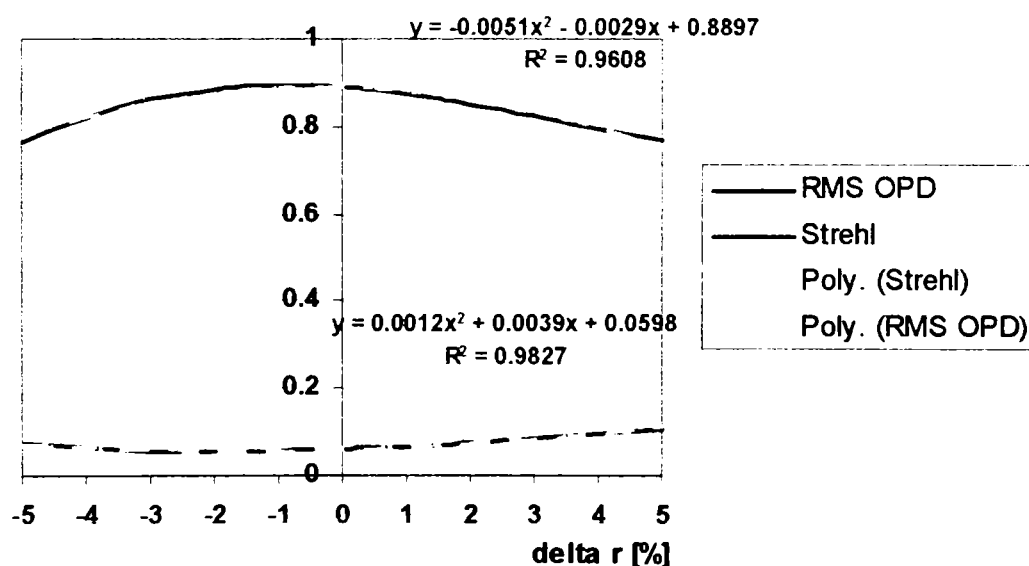


Fig.3.40. Variația parametrilor RMS OPD și Strehl funcție de Δr_5

Tabelul 3.21

$r_6 = -150.03 \text{ mm}$

Δr [%]	r [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [%]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	N [-]
-8.00	-138.02	49.0149	-1.77	0.104303	0.74801	-
-7.00	-139.52	49.1317	-1.54	0.093851	0.787021	-
-6.00	-141.02	49.2466	-1.31	0.085332	0.817318	-
-1.50	-147.77	49.7407	-0.32	0.063478	0.881799	8
-1.00	-148.52	49.7934	-0.21	0.062089	0.884953	5
-0.50	-149.28	49.8464	-0.10	0.060689	0.888234	3
0.00	-150.03	49.8982	0.00	0.059688	0.890895	0.00
0.50	-150.78	49.9496	0.10	0.058364	0.892673	3
1.00	-151.53	50.0007	0.21	0.057761	0.895081	5
5.00	-157.53	50.3951	1.00	0.056367	0.885219	-
8.00	-162.03	50.6755	1.56	0.066098	0.833515	-

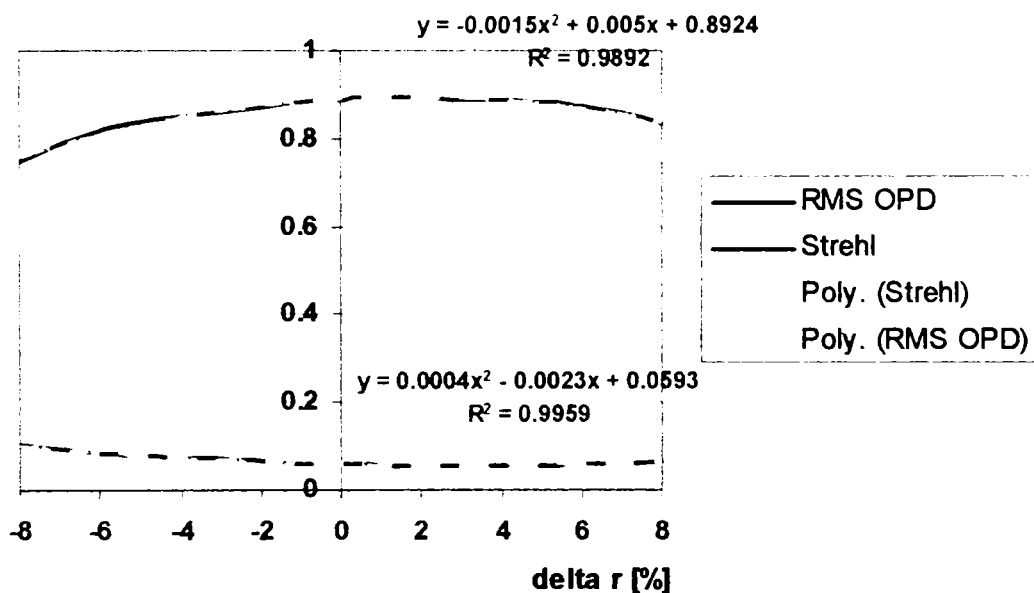


Fig.3.41. Variația parametrilor RMS OPD și Strehl funcție de Δr_6

Tabelul 3.22

$d_1 = 2.5 \text{ mm}$

Δd [%]	d [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [%]
10.0	2.75	49.9247	0.05
0.0	2.50	49.8982	0.00
-10.0	2.25	49.8717	0.05

Tabelul 3.23

$d_2 = 1.5 \text{ mm}$

Δd [%]	d [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [%]
10.0	1.65	49.8733	0.05
0.0	1.50	49.8982	0.00
-10.0	1.35	49.8702	0.06

Tabelul 3.24

$d_3 = 2.5 \text{ mm}$

Δd [%]	d [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [%]
10.0	2.75	49.93684	0.08
0.0	2.50	49.8982	0.00
-10.0	2.25	49.8068	0.18

Tabelul 3.25

$d_4 = 1.5 \text{ mm}$

Δd [%]	d [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [%]
10.0	1.65	49.8733	0.05
0.0	1.50	49.8982	0.00
-10.0	1.35	49.8701	0.06

Tabelul 3.26

$d_5 = 2.5 \text{ mm}$

Δd [%]	d [mm]	f' [mm]	$\Delta f'$ [%]
10.0	2.75	49.8985	0.00
0.0	2.50	49.8982	0.00
-10.0	2.25	49.8452	0.11

Analiza rezultatelor numerice și grafice de mai sus conduc la următoarele concluzii:

- abaterile dimensionale de la razele nominale afectează mai ales puterea sistemului, în sensul că valorile maxime admise sunt determinate de toleranța impusă distanței focale; parametrii de calitate a imaginii ar permite toleranțe dimensionale mai largi, cu condiția asigurării defocusării corespunzătoare
- pentru un șir mai lung de dioptri importanța ordinii lor relative scade; se poate admite pentru cazul analizat că toate cele șase raze pot fi tolerate cu $\pm(1...2)\%$
- grosimile influențează în măsură foarte redusă puterea sistemului, astfel încât pot fi admise abateri absolute de $\pm(0.1...0.2)\text{mm}$;
- grosimile influențează calitatea imaginii numai în măsura în care introduc necesitatea unei defocusări, dar valoarea acesteia este extrem de redusă, aproape nesemnificativă
- limitele abaterilor individuale maxime admise sunt prezentate în tabelul 3.27

Tabelul 3.27

Element geometric	Abatere dimensională [%]	Abatere la distanța focală [%]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]
r ₁	-1.5	-0.31	0.061625	0.894085
	+1.5	0.31	0.058391	0.887027
r ₂	-2.0	-0.40	0.057577	0.869757
	+1.0	0.19	0.067110	0.874718
r ₃	-1.5	-0.72	0.069909	0.886413
	+1.0	0.19	0.066584	0.875058
r ₄	-1.0	-0.50	0.065323	0.886608
	+2.0	0.93	0.057189	0.869595
r ₅	-4.0	-0.82	0.064291	0.819447
	+1.0	0.19	0.066584	0.875058
r ₆	-1.5	-0.32	0.063478	0.881799
	+1.0	0.21	0.057761	0.895081
d ₁	+10	+0.5	<0.07	>0.80
	-10	-0.5	<0.07	>0.80
d ₂	+10	+0.05	<0.07	>0.80
	-10	+0.06	<0.07	>0.80
d ₃	+10	+0.08	<0.07	>0.80
	-10	+0.18	<0.07	>0.80
d ₄	+10	+0.05	<0.07	>0.80
	-10	+0.06	<0.07	>0.80
d ₅	+10	+0.01	<0.07	>0.80
	-10	+0.06	<0.07	>0.80

3.2.3. Influența erorilor de montaj

Influența erorilor de poziție ale dioptrilor, respectiv descentrarea și înclinarea, asupra calității imaginii sistemului simetric analizat poate fi urmărită prin interpretarea datelor din tabelele 3.28... 3.38 și figurile 3.42... 3.52.

Tabelul 3.28

Δy_2

Δy [mm]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	Δy_F [mm]	Δz_F [mm]
0.000	0.059688	0.890914	0.00	0.00
0.001	0.059688	0.890587	-2.6216e-06	0.00
0.010	0.059716	0.890029	-2.6216e-05	0.00
0.050	0.060387	0.887271	-0.000131	0.00
0.100	0.062437	0.877583	-0.000262	1.5665e-10
0.150	0.065714	0.862004	-0.000393	4.2531e-10
0.200	0.070051	0.840638	-0.000524	8.2331e-10
0.250	0.075269	0.814584	-0.000655	1.3508e-09

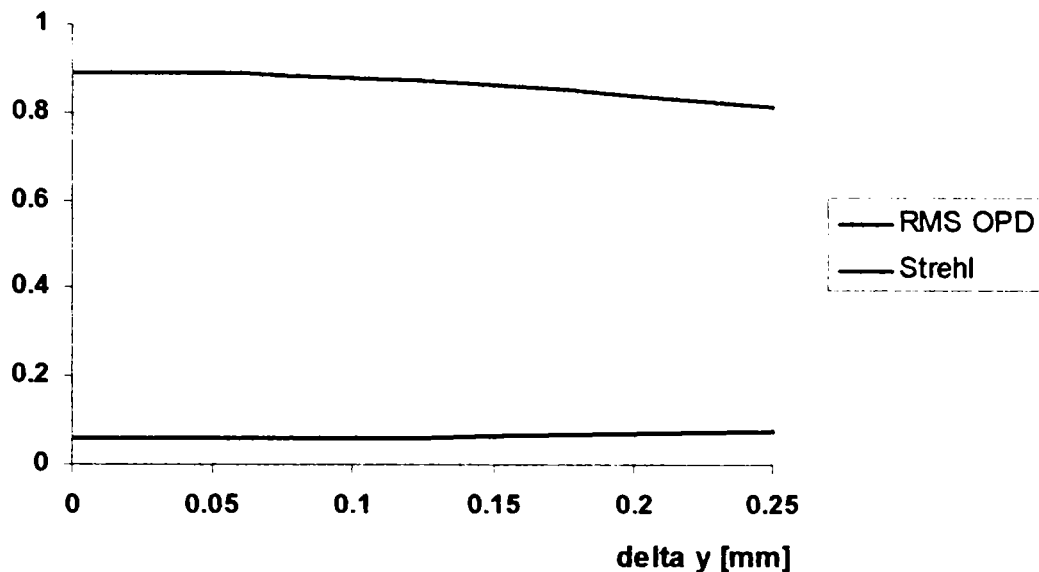


Fig.3.42. Variația parametrilor RMS OPD și Strehl funcție de descentrarea Δy_2

Tabelul 3.29

Δy_3

Δy [mm]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	Δy_F [mm]	Δz_F [mm]
0.000	0.059688	0.890914	0.00	0.00
0.001	0.059692	0.890315	4.2199e-06	1.0235e-08
0.010	0.060066	0.888876	4.2199e-05	-1.0716e-06
0.050	0.068514	0.851750	0.000211	-2.7299e-05
0.100	0.089937	0.747702	0.000422	-0.000109
0.150	0.117245	0.609298	0.000633	-0.000246
0.200	0.147201	0.471404	0.000844	-0.000437
0.250	0.178476	0.361421	0.001055	-0.000683

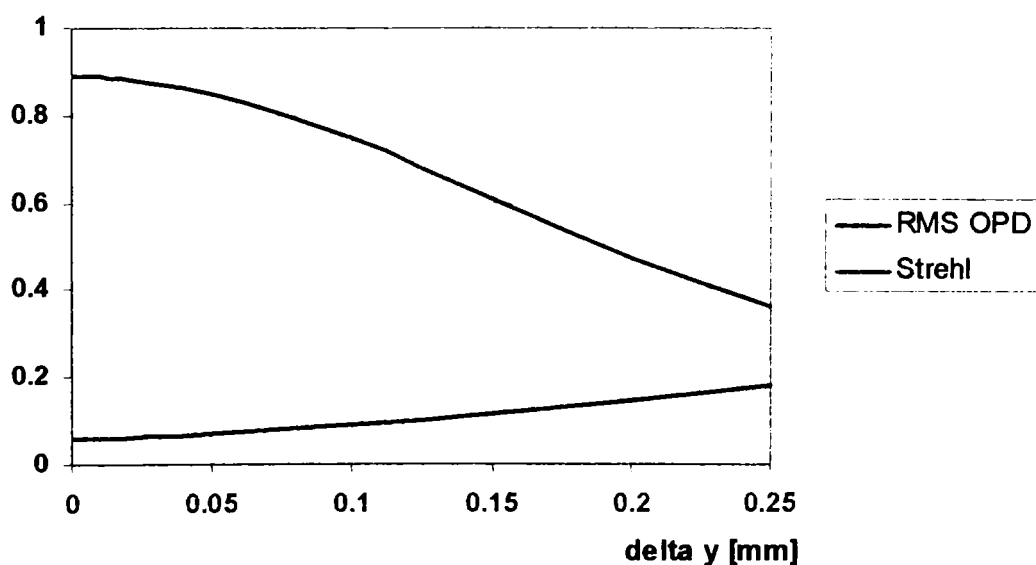


Fig.3.43. Variația parametrilor RMS OPD și Strehl funcție de descentrarea Δy_3

Tabelul 3.30

Δy_4

Δy [mm]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	Δy_F [mm]	Δz_F [mm]
0.000	0.059688	0.890914	0.00	0.00
0.001	0.059688	0.890618	-3.3006e-06	0.000683
0.010	0.059701	0.890245	-3.3006e-05	0.000685
0.050	0.060020	0.888588	-0.000165	0.000730
0.100	0.061008	0.884259	-0.000330	0.000871
0.150	0.062626	0.876982	-0.000495	0.001106
0.200	0.064835	0.866552	-0.000660	0.001434
0.250	0.067591	0.853481	-0.000825	0.001857

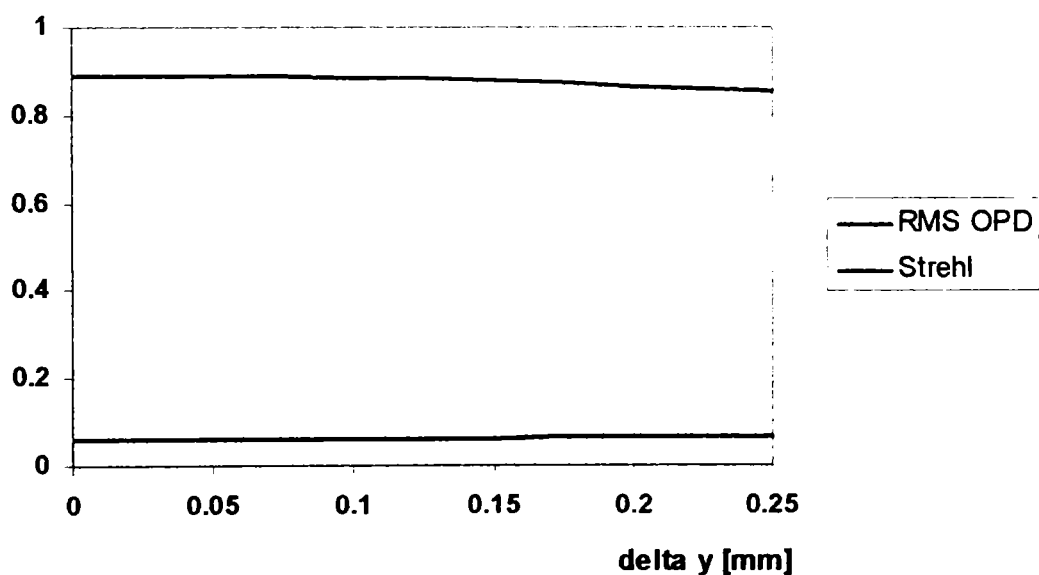


Fig.3.44. Variația parametrilor RMS OPD și Strehl funcție de descentrarea Δy_4

Tabelul 3.31

Δy_5

Δy [mm]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	Δy_F [mm]	Δz_F [mm]
0.000	0.059688	0.890914	0.00	0.00
0.001	0.059692	0.890259	-7.2248e-06	0.000683
0.010	0.060051	0.888599	-7.2248e-05	0.000686
0.050	0.068178	0.852315	-0.000361	0.000751
0.100	0.088913	0.749690	-0.000722	0.000954
0.150	0.115482	0.612167	-0.001084	0.001293
0.200	0.144714	0.474344	-0.001445	0.001768
0.250	0.175293	0.360463	-0.001806	0.002378

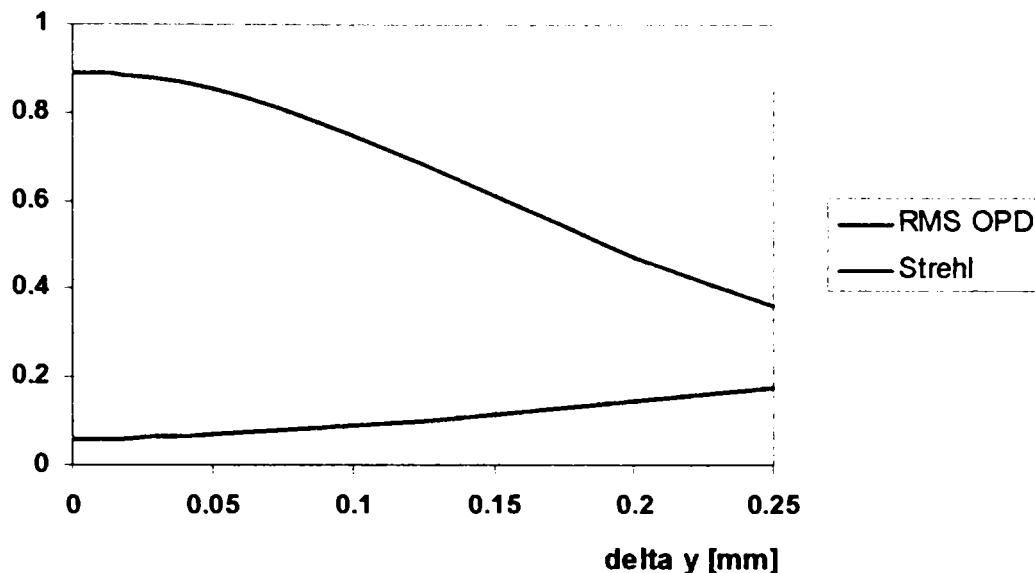


Fig.3.45. Variația parametrilor RMS OPD și Strehl funcție de descentrarea Δy_5

Tabelul 2.32

Δy_6

Δy [mm]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	Δy_F [mm]	Δz_F [mm]
0.000	0.059688	0.890914	0.00	0.00
0.001	0.059688	0.890679	-3.7274e-06	0.000683
0.010	0.059732	0.890230	-3.7274e-05	0.000685
0.050	0.060785	0.885453	-0.000186	0.000736
0.100	0.063964	0.871816	-0.000373	0.000894
0.150	0.068945	0.849025	-0.000559	0.001158
0.200	0.075381	0.818609	-0.000745	0.001527
0.250	0.082943	0.781091	-0.000931	0.002001

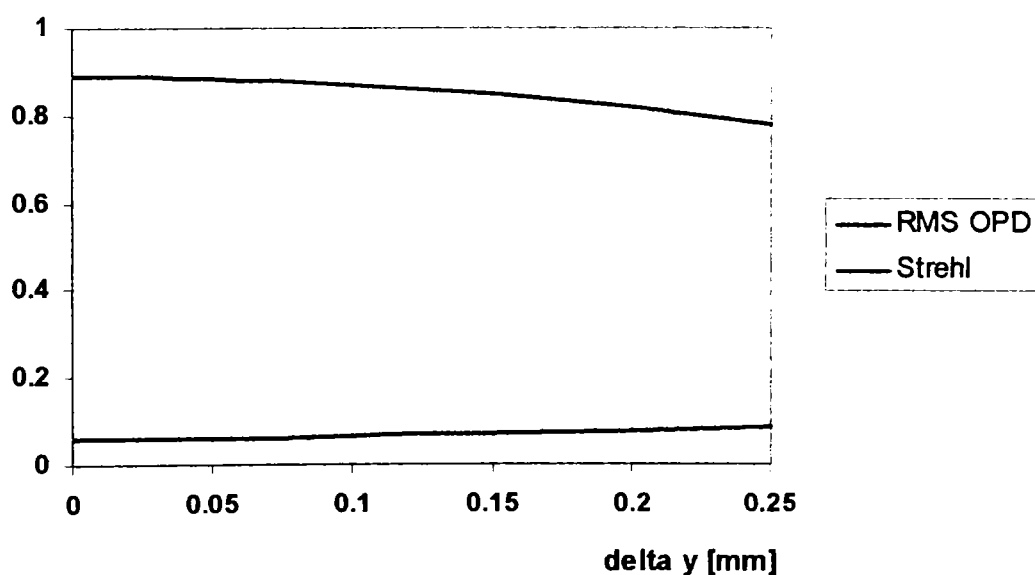


Fig.3.46. Variația parametrilor RMS OPD și Strehl funcție de descentrarea Δy_6

Tabelul 3.33

α_{y1}

α_y [°]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	Δx_F [mm]	Δz_F [mm]
0.0000	0.059688	0.890914	0.00	0.00
0.0003	0.059688	0.890668	1.8163e-06	0.000683
0.0010	0.059688	0.890597	6.0542e-06	0.000683
0.0020	0.059690	0.890504	1.2108e-05	0.000683
0.0200	0.059895	0.889137	0.000121	0.000677
0.0500	0.060973	0.884208	0.000303	0.000643
0.1000	0.064675	0.867555	0.000605	0.000522
0.2000	0.077747	0.802320	0.001211	3.9472e-05
0.5000	0.138317	0.461917	0.003028	-0.003340

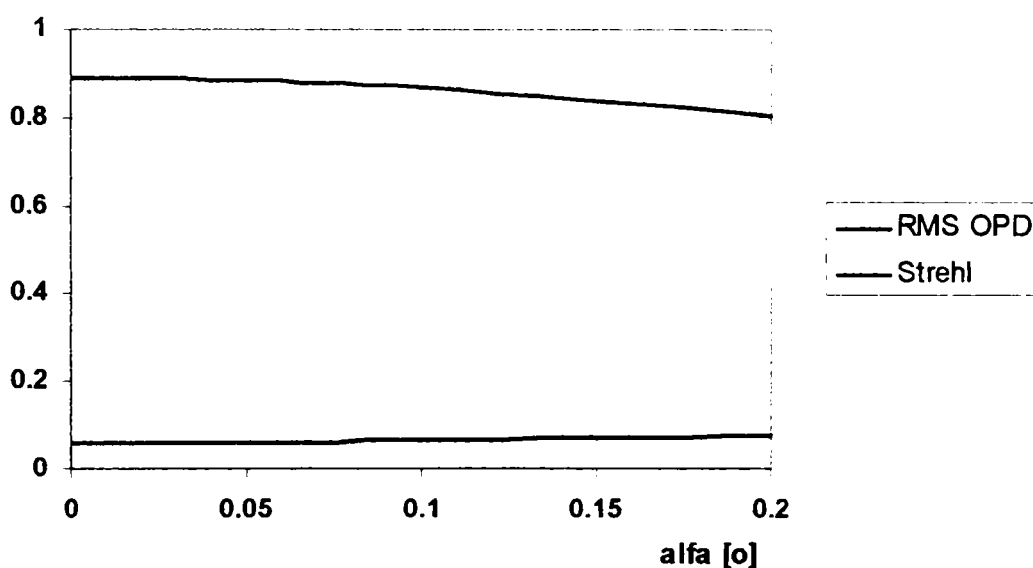


Fig.3.47. Variația parametrilor RMS OPD și Strehl funcție de înclinarea α_1

Tabelul 3.34

α_{y2}

α_y [°]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	Δx_F [mm]	Δz_F [mm]
0.0000	0.059688	0.890914	0.00	0.00
0.0003	0.059688	0.890608	3.3808e-06	0.000683
0.0010	0.059691	0.890390	1.1269e-05	0.000683
0.0020	0.059700	0.890294	2.2539e-05	0.000683
0.0200	0.060905	0.885029	0.000225	0.000666
0.0500	0.066930	0.857607	0.000563	0.000574
0.1000	0.085038	0.767160	0.001127	0.000248
0.2000	0.135083	0.511761	0.002254	-0.001056

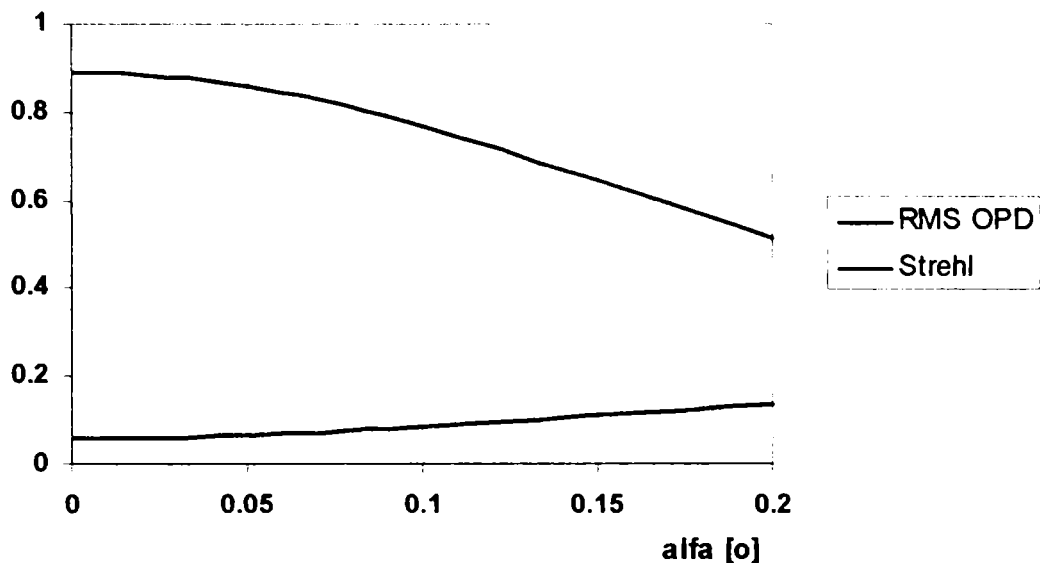


Fig.3.48. Variația parametrilor RMS OPD și Strehl funcție de înclinarea α_2

Tabelul 3.35

α_{y3}

α_y [°]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	Δx_F [mm]	Δz_F [mm]
0.0000	0.059688	0.890914	0.00	0.00
0.0003	0.059689	0.890450	4.5520e-06	0.000683
0.0010	0.059697	0.890209	1.5173e-05	0.000683
0.0020	0.059725	0.890052	3.0347e-05	0.000683
0.0200	0.063313	0.874358	0.000303	0.000660
0.0500	0.079684	0.796002	0.000759	0.000541
0.1000	0.121292	0.583372	0.001517	0.000115
0.2000	0.219494	0.249847	0.003035	-0.001590

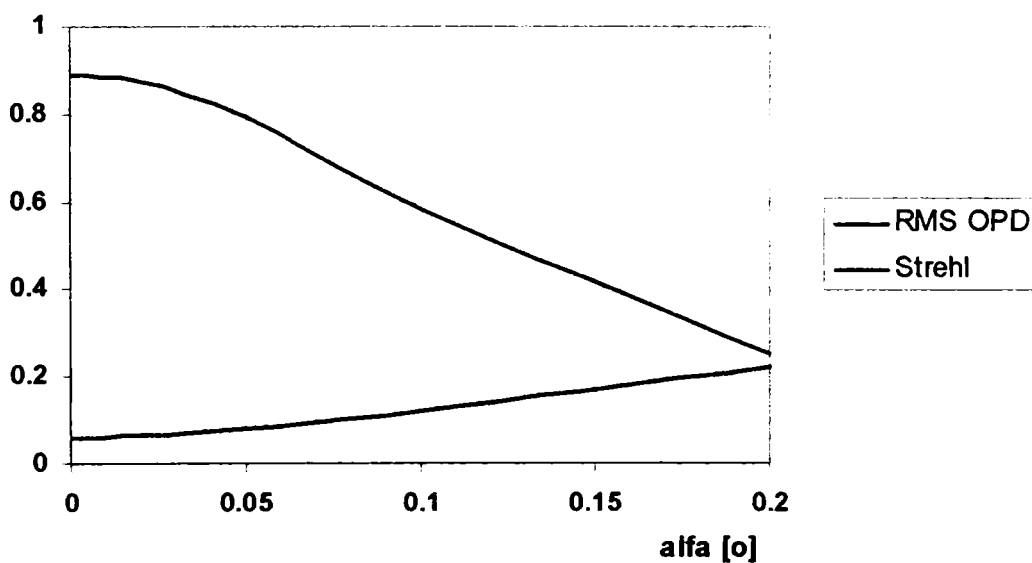


Fig.3.49. Variația parametrilor RMS OPD și Strehl funcție de înclinarea α_3

Tabelul 3.36

α_{y4}

α_y [°]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	Δx_F [mm]	Δz_F [mm]
0.0000	0.059688	0.890914	0.00	0.00
0.0003	0.059688	0.890776	1.3197e-06	0.000683
0.0010	0.059688	0.890670	4.3990e-06	0.000683
0.0020	0.059689	0.890483	8.7979e-06	0.000683
0.0200	0.059797	0.889838	8.7979e-05	0.000678
0.0500	0.060369	0.887462	0.000220	0.000652
0.1000	0.062367	0.878242	0.000440	0.000557
0.2000	0.069794	0.842963	0.000880	0.000181
0.5000	0.108448	0.630041	0.002200	-0.002458

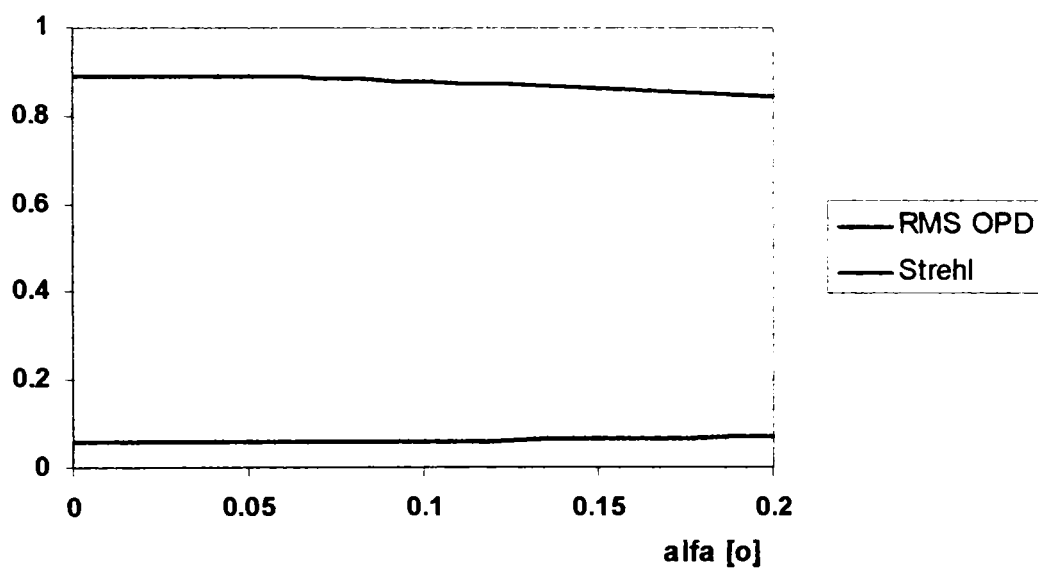


Fig.3.50. Variația parametrilor RMS OPD și Strehl funcție de înclinarea α_4

Tabelul 3.37

α_{y5}

α_y [°]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	Δx_F [mm]	Δz_F [mm]
0.0000	0.059688	0.890914	0.00	0.00
0.0003	0.059689	0.890506	2.9271e-06	0.000683
0.0010	0.059695	0.890057	9.7570e-06	0.000683
0.0020	0.059716	0.890314	1.9514e-05	0.000683
0.0200	0.062473	0.877903	0.000195	0.000667
0.0500	0.075428	0.818063	0.000488	0.000583
0.1000	0.109864	0.642644	0.000976	0.000284
0.2000	0.193914	0.312386	0.001952	-0.000913

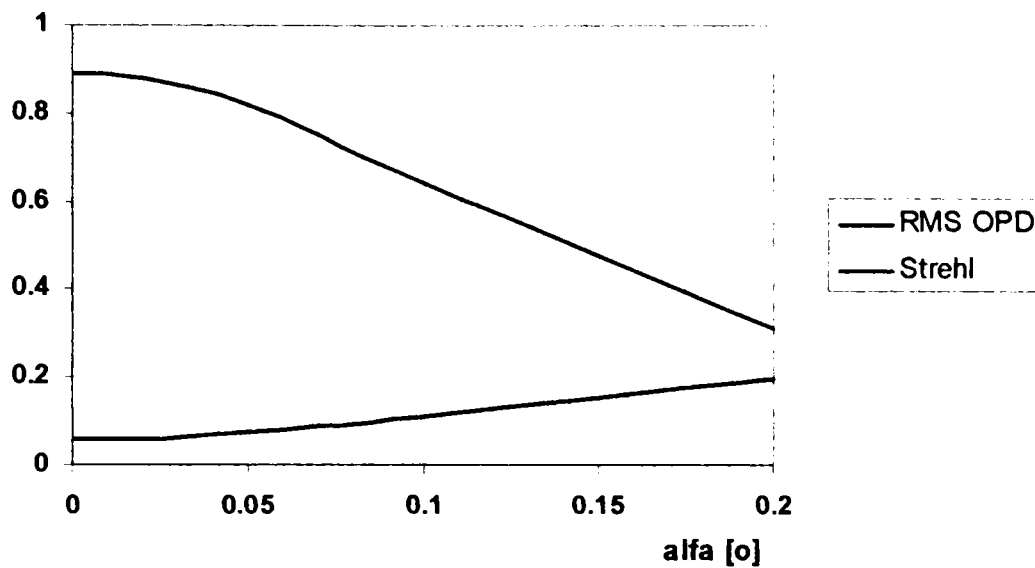


Fig.3.51. Variația parametrilor RMS OPD și Strehl funcție de înclinarea α_5

Tabelul 3.38

α_{y6}

α_y [°]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	Δx_F [mm]	Δz_F [mm]
0.0000	0.059688	0.890914	0.00	0.00
0.0003	0.059688	0.890627	2.2965e-06	0.000683
0.0010	0.059690	0.890436	7.6551e-06	0.000683
0.0020	0.059697	0.890237	1.5310e-05	0.000683
0.0200	0.060582	0.886417	0.000153	0.000669
0.0500	0.065073	0.866408	0.000383	0.000592
0.1000	0.079059	0.799445	0.000766	0.000317
0.2000	0.119675	0.592220	0.001531	-0.000780

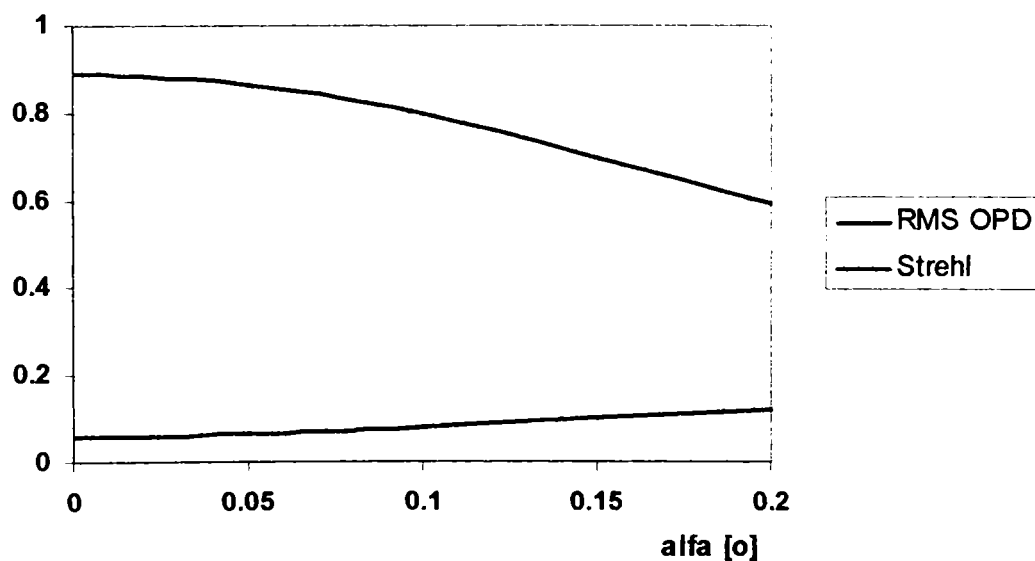


Fig.3.52. Variația parametrilor RMS OPD și Strehl funcție de înclinarea α_6

Rezultatele simulărilor de mai sus conduc la următoarele observații:

- erorile de montaj (poziții relative incorecte ale dioptrilor, cuantificabile prin descentrări și înclinări) influențează cu un factor de corelație ridicat și un gradient al intensității de descalificare a parametrilor de calitate a imaginii
- cea mai importantă eroare de montaj este înclinarea dioptrilor în raport cu axa y: efectele sale sunt mai intense și mai rapide decât ale descentrării
- standardele de reprezentare și cotare a reperelor optice nu prevăd în mod explicit toleranțele admise pentru înclinarea dioptrilor sau componentelor, ci se referă doar la descentrări admise
- exemplul analizat arată că erorile aferente dioptrilor din interiorul șirului care definește sistemul, cu precădere cei corespunzători suprafețelor lipite sensibilizează în mai mare măsură variațiile parametrilor de calitate a imaginii. În tabelul 3.38 sunt prezentate sintetic abaterile maxime pentru care sistemul satisface, la limită criteriul Rayleigh, fiind luate în considerare abaterile individuale ale fiecărui dioptru.

Se observă că, în mod aparent paradoxal, pentru sistemul cu mai mulți dioptri abaterile maxime individuale au valori mai mari decât în cazul sistemului cu trei dioptri. Este, totuși, explicabil faptul că variația unei singure variabile într-un șir mai lung în care celelalte elemente sunt la valori nominale, să fie mai redusă. Este, de asemenea, de așteptat, ca întreg sistemul să nu admită la același nivel abaterile individuale și să păstreze încadrarea calitativă de limitat la difracție, așa cum s-a dovedit valabil în cazul sistemului mai simplu, format din numai trei dioptri.

Tabelul 3.39

Numărul de ordine al dioptrului	Abatere maximă (descentrare/înclinare)	RMS OPD [·]	Strehl [-]
1	înclinare: $\pm 0.1^\circ$	0.064675	0.867555
2	descentrare: $\pm 0.15\text{mm}$	0.065714	0.862004
	înclinare: $\pm 0.05^\circ$	0.066930	0.857607
3	descentrare: $\pm 0.05\text{mm}$	0.068514	0.851750
	înclinare: $\pm 0.02^\circ$	0.063313	0.874358
4	descentrare: $\pm 0.25\text{mm}$	0.067591	0.853481
	înclinare: $\pm 0.2^\circ$	0.069794	0.842963
5	descentrare: $\pm 0.05\text{mm}$	0.068178	0.852315
	înclinare: $\pm 0.02^\circ$	0.062473	0.877903
6	descentrare: $\pm 0.15\text{mm}$	0.068945	0.849025
	înclinare: $\pm 0.05^\circ$	0.065073	0.866408

3.2.4. Analiza influenței cumulate a erorilor de execuție și montaj

Valorile abaterilor simulate pentru inițierea studiului, vor fi ca și în cazul anterior, cele admise ca maxime luând în considerare efectul individual:

- $\Delta r_1 = +1\%$
- $\Delta r_2 = + 1\%$
- $\Delta r_3 = + 2\%$
- $\Delta r_4 = + 2\%$
- $\Delta r_5 = + 1\%$
- $\Delta r_6 = + 1.5\%$
- $\Delta d_{1,5} = +10\%$

S-au obținut următoarele rezultate (fig. 3.53 și tab. 3.40):

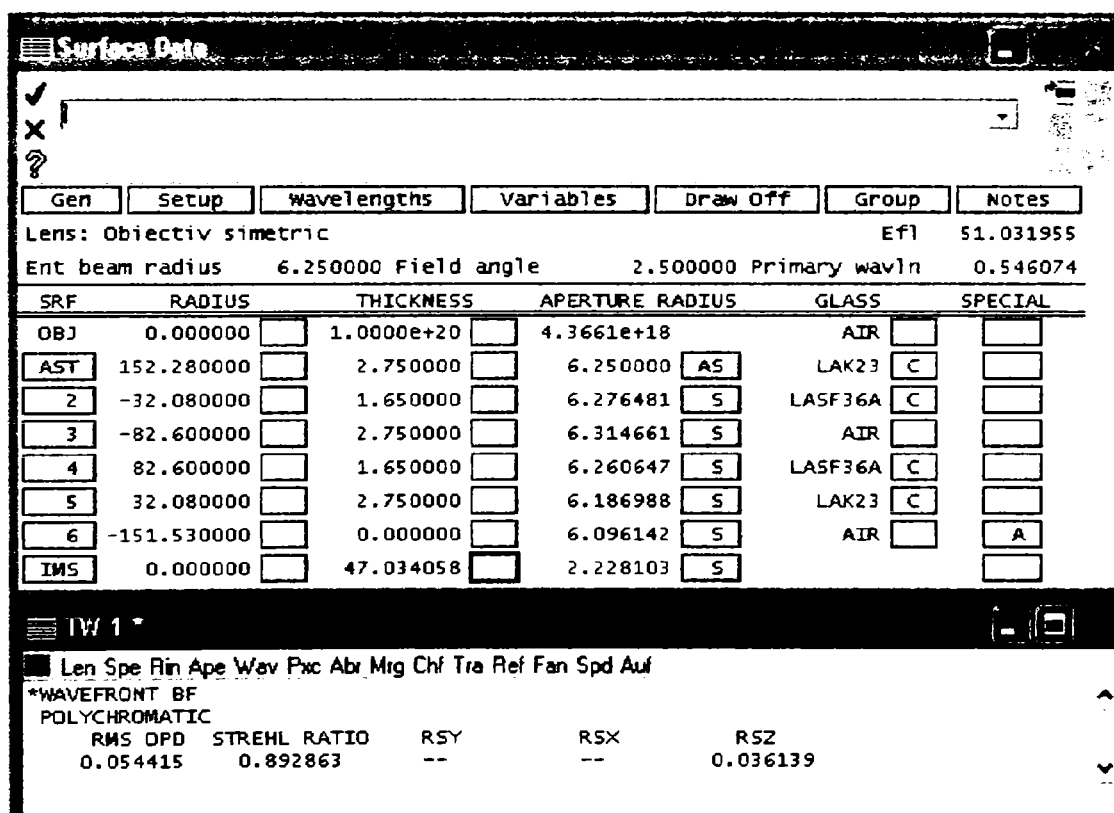


Fig.3.53. Foaia de date a sistemului cu erori de execuție maxime pozitive

Tabelul 3.40

	f' [mm]	$\Delta f'$ [%]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	Δz [mm] (defocusare)
sistem ideal	49.898225	0.00	0.059688	0.890895	0.00
sistem afectat de erori	51.031955	2.27	0.054415	0.892863	0.036139

Se observă că din punct de vedere calitativ sistemul nu a fost afectat, dacă reglarea pe standul de montaj asigură impunerea unei defocusări de aproximativ 4 sutimi de

milimetru, în schimb puterea sistemului a scăzut sub limita admisă (eroarea la distanța focală este de 2.27%). Rezultă că, față de sistemul mai simplu analizat anterior la care puteau fi acceptate abaterile determinate pe baza influenței lor individuale, la un sistem mai complex toleranțele trebuie să fie mai strânse. Se poate concluziona că, în general, pe măsură ce numărul dioptrilor care formează sistemul optic, abaterile admise la mărimea razelor și a grosimilor trebuie să fie tot mai scăzute și deci, precizia de prelucrare necesară este mai ridicată.

Pentru următoarea iterație de studiu s-au restrâns cu un pas abaterile admise la raze:

- $\Delta r_1 = +1.5\%$
- $\Delta r_2 = +0.5\%$
- $\Delta r_3 = +0.5\%$
- $\Delta r_4 = +1\%$
- $\Delta r_5 = +0.5\%$
- $\Delta r_6 = +0.5\%$
- $\Delta d_{1,5} = +10\%$

cu rezultatele din figura 3.54 și tabelul 3.41.

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	4.3661e+18	AIR	
AST	151.530000	2.750000	6.250000 AS	LAK23	C
2	-31.930000	1.650000	6.276257 S	LASF36A	C
3	-81.390000	2.750000	6.314421 S	AIR	
4	81.790000	1.650000	6.257858 S	LASF36A	C
5	31.920000	2.750000	6.182824 S	LAK23	C
6	-150.780000	0.000000	6.089689 S	AIR	A
IMS	0.000000	46.429016	2.201860 S		

Len	Spe	Rin	Ape	Wav	Pxc	Abr	Mrg	Chf	Tra	Ref	Fan	Spd	Auf
*WAVEFRONT BF POLYCHROMATIC													
	RMS OPD	STREHL RATIO	RSY	RSX	RSZ								
	0.055936	0.899981	--	--	0.026044								

Fig. 3.54. Valorile efective admisibile ale razelor cu abateri pozitive pentru încadrarea sistemului în toleranța la distanța focală

Tabelul 3.40

	f' [mm]	$\Delta f'$ [%]	RMS OPD [λ]	Strehl [-]	Δz [mm] (defocusare)
sistem ideal	49.898225	0.00	0.059688	0.890895	0.00
sistem afectat de erori	50.430895	1.06	0.055936	0.8999981	0.026044

Considerând stabilite erorile de execuție admise, se simulează efectul celor de montaj, cu valorile inițiale:

- $\Delta y_2 = 0.2$
- $\Delta y_3 = 0.05$
- $\Delta y_4 = 0.25$
- $\Delta y_5 = 0.05$
- $\Delta y_6 = 0.2$
- $\Delta \alpha_1 = 0.1^\circ$
- $\Delta \alpha_2 = 0.05^\circ$
- $\Delta \alpha_3 = 0.02^\circ$
- $\Delta \alpha_4 = 0.02^\circ$
- $\Delta \alpha_5 = 0.02^\circ$
- $\Delta \alpha_6 = 0.02^\circ$

Foia de date și analiza frontului de undă indică o drastică scădere a calității imaginii (fig.3.55).

Având în vedere saltul calitativ semnificativ, pentru următoarea iterație s-au luat în considerare valori ale descentrărilor și înclinărilor cu două trepte de restrângere a abaterilor. Rezultatul la care s-a ajuns nu a fost satisfăcător, astfel încât s-a recurs la mai multe iterații succesive, tot mai restrictive. În plus, s-a urmărit, pe cât posibil uniformizarea valorilor abaterilor admise pentru simplificarea prescripțiilor.

Soluția finală considerată optimă, conținând explicit valorile maxime permise razelor grosimilor, descentrărilor și înclinărilor, precum și valorile parametrilor de calitate în condițiile unei defocusări corespunzătoare sunt prezentate în figura 3.56.

Același tip de studiu iterativ s-a practicat și pentru abaterile negative la dimensiunile razelor și grosimilor.

Este omisă ilustrarea iterațiilor intermediare cu rezultate nesatisfăcătoare și este prezentată numai soluția finală în figura 3.57.

Surface Data

Gen Setup wavelengths variables Draw Off Group Notes

Lens: Obiectiv simetric

Ent beam radius 6.250000 Field angle 2.500000 Primary wavln 0.546074

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	4.3661e+18	AIR	
AST	151.530000	2.750000	6.250000 AS	LAK23	C
2	-31.930000	1.650000	6.276257 S	LASF36A	C
3	-81.390000	2.750000	6.314421 S	AIR	C
4	81.790000	1.650000	6.257858 S	LASF36A	C
5	31.920000	2.750000	6.182824 S	LAK23	C
6	-150.780000	0.000000	6.089689 S	AIR	CA
IMS	0.000000	46.429016	2.201860 S		

TH 1 *

Len Spe Rin Ape Wav Pxc Abr Mrg Chf Tra Ref Fan Spd Aul

*WAVEFRONT BF POLYCHROMATIC

RMS OPD	STREHL RATIO	RSY	RSX	RSZ
0.141420	0.453728	-0.002180	0.001888	0.033923

Slider Window

TLB	Value	Step
TLB 1	0.100000	Step 0.1
DCY 2	0.200000	Step 0.1
TLB 2	0.050000	Step 0.01
DCY 3	0.050000	Step 0.01
TLB 3	0.020000	Step 0.01
DCY 4	0.250000	Step 0.01
TLB 4	0.020000	Step 0.01
DCY 5	0.050000	Step 0.01
TLB 5	0.020000	Step 0.01
DCY 6	0.200000	Step 0.1

Fig.3.55. Foaia de date a sistemului cu erori de execuție pozitive și erori de montaj la valorile maxime admise ca influențe individuale

Surface Data

Gen Setup Wavelengths Variables Draw Off Group Notes

Lens: Obiectiv simetric
Ent beam radius 6.250000 Field angle 2.500000 Primary wavln 0.546074

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	4.3661e+18	AIR	
AST	151.530000	2.750000	6.250000	LAK23	C
2	-31.930000	1.650000	6.276257	LASF36A	C
3	-81.390000	2.750000	6.314421	AIR	C
4	81.790000	1.650000	6.257858	LASF36A	C
5	31.920000	2.750000	6.182824	LAK23	C
6	-150.780000	0.000000	6.089689	AIR	CA
IMS	0.000000	46.429016	2.201860		

Len Spe Rin Ape Wav Pxc Abr Mrg CN Tra Ref Fan Spd Aut

*WAVEFRONT BF POLYCHROMATIC

RMS OPD	STREHL RATIO	RSY	RSX	RSZ
0.064800	0.861304	-8.7495e-05	0.000537	0.025950

Slider Window

TLB 1	0.010000	Step 0.01
DCY 2	0.010000	Step 0.01
TLB 2	0.010000	Step 0.01
DCY 3	0.010000	Step 0.001
TLB 3	0.005000	Step 0.001
DCY 4	0.010000	Step 0.01
TLB 4	0.010000	Step 0.01
DCY 5	0.005000	Step 0.001
TLB 5	0.010000	Step 0.01
DCY 6	0.010000	Step 0.01
TLB 6	0.020000	Step 0.01

Fig.3.56. Foaia de date, valorile admise ale erorilor de execuție (abateri pozitive) și montaj pentru păstrarea caracteristicilor sistemului limitat la difracție

În sinteză se pot formula următoarele observații:

- erorile de execuție afectează în special puterea sistemului optic. Urmărind tabloul conținând combinațiile posibile de abateri pozitive și negative ale razelor și grosimilor, în tabelul 3.41, se poate recomanda prescrierea toleranțelor pentru raze în intervalul $(\pm 0.5... \pm 1)\%$ și pentru grosimi în domeniul $\pm 1\%$, pentru ca distanța focală să nu înregistreze o abatere mai mare de $\pm 1\%$

Surface Data

Gen Setup Wavelengths Variables Draw Off Group Notes

Lens: Obiectiv simetric

Ent beam radius 6.250000 Field angle 2.500000 Primary wavin 0.546074

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20	4.3661e+18	AIR	
AST	147.780000	2.250000	6.250000	LAK23	C
2	-31.130000	1.350000	6.270537	LASF36A	C
3	-79.770000	2.250000	6.301713	AIR	C
4	80.180000	1.350000	6.252729	LASF36A	C
5	30.490000	2.250000	6.189552	LAK23	C
6	-147.770000	0.000000	6.111781	AIR	CA
IMS	0.000000	46.191630	2.159824		

Len Spe Rin Ape Wav Pxc Abr Mrg Chf Tra Ref Fan Spd Aut

*WAVEFRONT BF POLYCHROMATIC

RMS OPD	STREHL RATIO	RSY	RSX	RSZ
0.071881	0.807300	-0.000108	0.000554	0.042745

TLB 1	0.010000			Step 0.01
DCY 2	0.010000			Step 0.01
TLB 2	0.010000			Step 0.01
DCY 3	0.010000			Step 0.001
TLB 3	0.005000			Step 0.001
DCY 4	0.010000			Step 0.01
TLB 4	0.010000			Step 0.01
DCY 5	0.005000			Step 0.001
TLB 5	0.010000			Step 0.01
DCY 6	0.010000			Step 0.01
TLB 6	0.020000			Step 0.01

Fig.3.57. Foaia de date, valorile admise ale erorilor de execuție (abateri negative) și montaj pentru păstrarea caracteristicilor sistemului limitat la difracție

Tabelul 3.41

Δr [%]	Δd [mm]	f [mm]	Δf [%]
-1	-0.1	49.36200	-1.07
+1	-0.1	50.33471	+0.87
-0.5	-0.1	49.91489	+0.03
+0.5	-0.1	49.87591	-0.04
-1	+0.1	49.46143	-0.87
+1	+0.1	50.43328	+1.07
-0.5	+0.1	49.92086	+0.04
+0.5	+0.1	50.03030	-0.26

Abaterile procentuale admise pentru raze corespund unor abateri exprimate în unități de lungime care variază în limite foarte largi funcție de valoarea razei nominale. Rezultă că

numărul de inele de interferență, ca indicator al toleranțelor admise pentru raze, nu poate fi pus în legătură directă cu abaterea procentuală. În plus numărul de inele depinde și de gabaritul radial al lentilei, astfel încât cea mai rațională recomandare este aceea de a determina pentru fiecare caz particular numărul N adecvat.

Pentru a ilustra dependența $N(r/D)^2$ în figurile 3.58 și 3.59 sunt trasate curbele de variație a numărului de inele pentru un domeniu de raze $r=[10...150]$ mm și deschideri $D=[10...50]$ mm, considerate uzuale. Figura 3.58 ilustrează variația funcției $N(r/D)^2$ pentru o abatere absolută $\Delta r=0.5$ mm. Același tip de reprezentare pentru $\Delta r=0.1$ mm poate fi urmărit în figura 3.59.

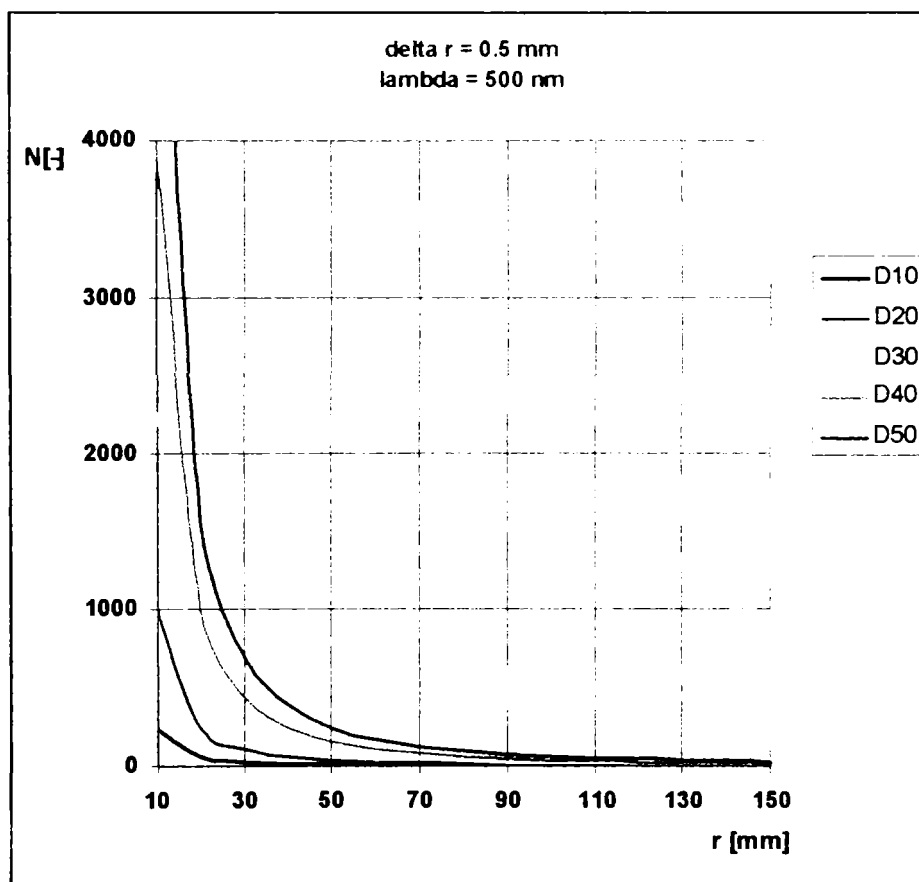


Fig.3.58. Variația numărului de inele de interferență corespunzător unei abateri absolute $\Delta r=0.5$ mm, pentru raze nominale cuprinse în intervalul $[10...50]$, la deschideri $D=[10...50]$ mm

- descentrarea admisă nu trebuie să depășească în valoare absolută o sutime de milimetru, iar înclinarea dioptrilor trebuie diferențiată pe dioptri, fiind parametrul care sensibilizează cel mai puternic indicatorii de calitate. Valorile admise pentru descentrare, așa cum au fost deduse prin simulare, nu au putut conduce la formularea unei reguli generale de prescriere, având în vedere că variază foarte mult, diferențele fiind de un ordin de mărime (de la 0.02° până la 0.005° , ceea ce echivalează cu intervalul $\sim 1' \dots \sim 10''$).

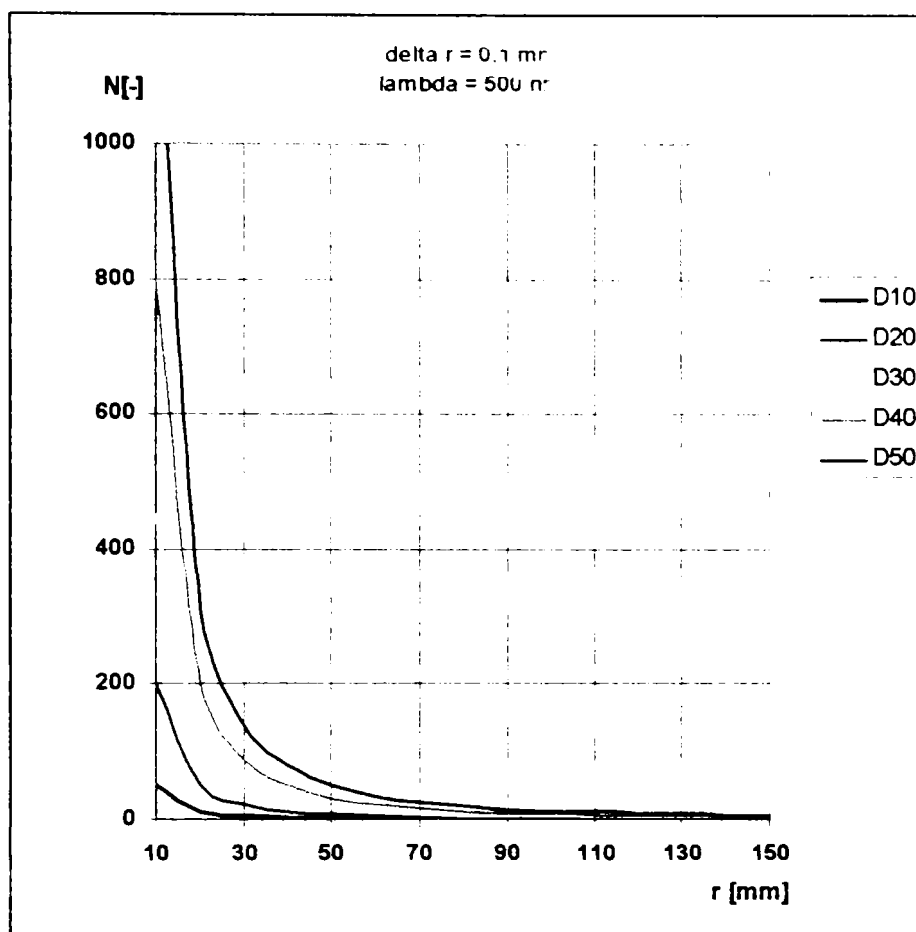


Fig.3.59. Variația numărului de inele de interferență corespunzător unei abateri absolute $\Delta r = 0.1 \text{ mm}$, pentru raze nominale cuprinse în intervalul $[10 \dots 50]$, la deschideri $D = [10 \dots 50] \text{ mm}$

Erorile de montaj vizează atât realizarea subansamblurilor formate din componente lipite, cât și fixarea propriu-zisă a întregului ansamblu în tubul mecanic.

Stabilirea abaterilor admise de tipul descentrării și înclinării trebuie să se finalizeze cu prescrierea unui ajustaj rațional la îmbinarea cu joc a părților optice și mecanice.

Prescrierea toleranțelor pentru reperele optice și mecanice, în opinia autoarei, trebuie să aibă în vedere următoarele aspecte:

- montarea subansamblului optic în tubul mecanic se face prescriind un ajustaj cu joc
- tolerarea mai strânsă trebuie prescrisă monturii metalice având în vedere posibilitățile tehnologice și precizia mașinilor de prelucrare a metalelor și sticlei
- centrarea și înclinarea relativă a componentelor lipite ale unui subansamblu se realizează pe standuri special destinate, atașate mașinilor de debordat care prelucrează suprafața exterioară, laterală a subansamblului, a cărei dimensiune radială efectivă rezultă în urma operației de debordare
- prin prescrierea ajustajului subansamblu optic-montură se controlează efectiv numai descentrarea globală a sistemului optic

- jocul efectiv reprezintă dublul descentrării reziduale a sistemului optic (fig. 3.58). Rezultă că cel puțin jocul mediu, cel mai probabil, nu trebuie să depășească dublul descentrării admise
- descentrările admise nu variază semnificativ cu apertura sistemului, în timp ce, conform standardelor de toleranțe și ajustaje în vigoare, valoarea jocului minim, respectiv maxim, pentru același tip de ajustaj variază foarte mult funcție de dimensiunea nominală. Rezultă că, cel puțin pe domenii de dimensiuni de gabarit radial al ansamblului optomecanic, ajustajul trebuie să difere pentru a asigura aceeași descentrare maximă

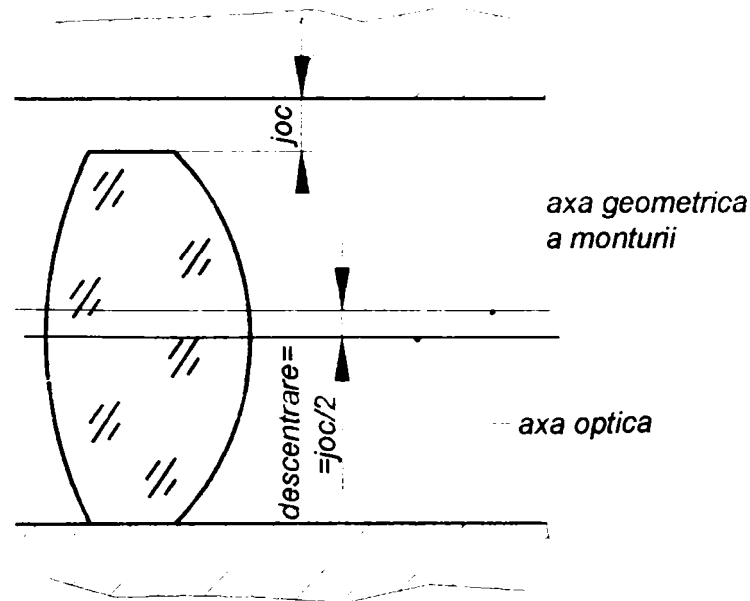


Fig.3.58. Relația dintre jocul montură-piesă optică și descentrarea sistemului optic

- pentru asigurarea descentrărilor cât mai mici trebuie prescrise ajustaje cu jocuri mici, cu diferențe cât mai mici între jocul minim și maxim și rezultate prin îmbinarea unei piese mecanice cu câmpuri de toleranță reduse cu piese optice cu câmpuri de toleranță mai largi; în aceste condiții devin recomandabile ajustaje de tipul H/e și H/f
- pentru a pune în evidență importanța poziției și mărimii câmpului de toleranță și, de asemenea, a dimensiunii nominale a îmbinării, se prezintă în tabelul 3.42 un studiu comparativ a cinci tipuri de ajustaje pentru trei dimensiuni nominale.
- studiul pe orizontală a tabelului de mai sus pune în evidență clar creșterea erorii de descentrare a sistemului optic odată cu creșterea aperturii, la același ajustaj prescris; o proiectare corectă a ansamblului optomecanic trebuie să aibă în vedere acest aspect foarte important
- studiul pe verticală al tabelului arată că îmbinarea este mai eficientă prin impunerea unor ajustaje cu jocuri mai mici; acestea rezultă ca diferențe ale unor abateri superioară și inferioară mai mici ale ambelor piese ale îmbinării; dacă pentru montura metalică prelucrarea cu precizie ridicată nu reprezintă o dificultate deosebită, trebuie

avut în vedere faptul că partea optică are ca ultimă operație de prelucrare o strunjire, eventual cu caracter de finisare și nu o operație de rectificare, care nu este indicată din punct de vedere funcțional (nu se urmărește ci este chiar contraindicată superfinisarea până la transparentă a suprafeței laterale); în ultimă instanță alegerea ajustajului depinde și de tehnologia disponibilă pentru fiecare aplicație în parte.

Tabelul 3.42

	Caracteristici ajustaj	Φ15	Φ21	Φ40
H8/f9	abateri alezaj [μm]	+27/0	+33/0	+39/0
	abateri arbore [μm]	-32/-75	-40/-92	-50/-112
	joc minim/maxim [μm]	32/102	40/125	50/151
	joc mediu [μm]	67	82	100
	descentrare medie introdusă în sistemul optic [μm]	33	41	50
H8/f8	abateri alezaj [μm]	+27/0	+33/0	+39/0
	abateri arbore [μm]	-16/-43	-20/-53	-25/-64
	joc minim/maxim [μm]	16/70	20/86	25/103
	joc mediu [μm]	43	53	64
	descentrare medie introdusă în sistemul optic [μm]	21	26	32
H7/f6	abateri alezaj [μm]	+18/0	+21/0	+25/0
	abateri arbore [μm]	-16/-27	-20/-33	-25/-41
	joc minim/maxim [μm]	16/45	20/54	25/66
	joc mediu [μm]	30	37	45
	descentrare medie introdusă în sistemul optic [μm]	15	18	22
H6/e7	abateri alezaj [μm]	+13/0	+13/0	+16/0
	abateri arbore [μm]	-40/-61	-40/-61	-20/-33
	joc minim/maxim [μm]	40/74	40/74	20/49
	joc mediu [μm]	57	57	35
	descentrare medie introdusă în sistemul optic [μm]	28	28	17
H6/f6	abateri alezaj [μm]	+13/0	+13/0	+16/0
	abateri arbore [μm]	-16/-27	-20/-33	-25/-41
	joc minim/maxim [μm]	16/40	20/46	25/57
	joc mediu [μm]	28	33	41
	descentrare medie introdusă în sistemul optic [μm]	14	16	20

- în concluzie se poate spune că prescrierea ajustajului este impusă de mărimea descentrării admise, de gabaritul radial nominal al îmbinării și de tehnologia de prelucrare disponibilă
- în ceea ce privește efectul înclinării, analizele prezentate se consideră absolut acoperitoare având în vedere faptul că s-au simulat la nivelul dioptrilor. În practică, acestea se manifestă la nivelul componentelor (lentilă singulară, dublet sau triplet lipit) în raport cu montura. La nivelul de componentă sau subansamblu lipit problema înclinării este rezolvată odată cu centrarea, prin poziționarea relativă a lentilelor înainte de lipire, cu ajutorul unor dispozitive optice. În mod semnificativ, înclinarea poate fi introdusă de prelucrarea necorespunzătoare a umărului de sprijin axial al

monturii (fig.3.59). Înclinarea subansamblului optic poate fi limitată prin tolerarea corespunzătoare a bătăii frontale a suprafeței de sprijin a monturii. Din figură rezultă că bătaia frontală maximă admisă depinde de înclinarea maximă admisă pentru sistemul optic și de apertura acestuia:

$$B_f = D_u \operatorname{tg} \alpha_{\max} \quad (3.5)$$

Ca ordin de mărime, luând în considerare ultimul exemplu analizat, cu diametrul util $D_u = 13 \text{ mm}$ și $\alpha_{\max} = 0.02^\circ$, bătaia frontală maximă la prelucrarea suprafeței monturii este:

$$B_f = 13 * \operatorname{tg} 0.02 = 4.5 \mu\text{m}. \quad (3.6)$$

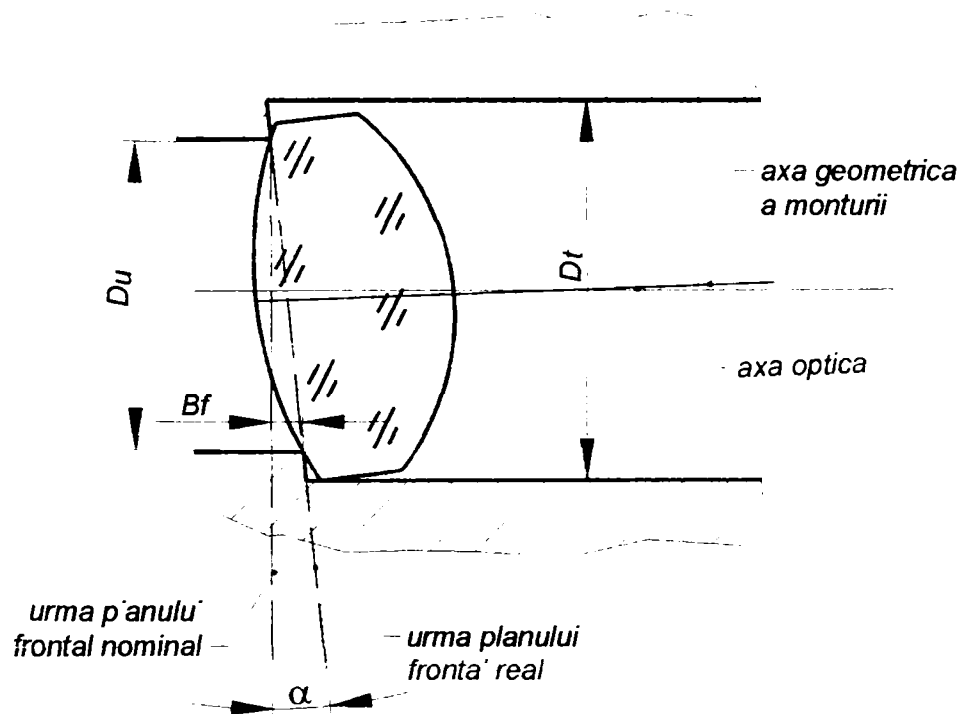


Fig.3.59. Înclinarea componentei optice datorită bătăii frontale a suprafeței de sprijin axial al monturii

3.3. CONCLUZII

În rezumat, capitolul al treilea al prezentei lucrări a pus în discuție următoarele probleme:

- stabilirea abaterilor maxime ale dimensiunilor razelor și grosimii lentilelor și ale poziției relative ale dioptrilor astfel încât imaginea formată de sistemul real să păstreze categoria de calitate a sistemului rezultat prin calculul de proiectare, care operează cu valori nominale
- s-au efectuat analize asupra unor sisteme de cea mai bună calitate – sisteme limitate de difracție
- s-a considerat oportună abordarea problemelor de la simplu la complex, astfel încât

analiza a luat în considerare cel mai simplu sistem optic limitat la difracție (dubletul care conține trei dioptri) și un sistem mai complex format din șase dioptri

- ❑ studiul s-a bazat pe modelarea matematică a sistemului optic analizat și simularea erorilor de execuție și montaj
- ❑ au fost luate în considerare abaterile dimensionale de la valorile nominale ale razelor și grosimilor și erorile de descentrare și înclinare în raport cu axa y
- ❑ întregul demers de cercetare a utilizat un soft specializat, dedicat calculului optic – OSLO LT produs de firma Sinclair Optics
- ❑ analiza a urmărit influența individuală a fiecărui parametru geometric și de poziție a dioptrilor sistemelor, iar pentru evaluarea influenței abaterilor s-au utilizat trei parametri: puterea optică, RMS OPD și raportul Strehl, considerând că cele trei elemente oferă o caracterizare completă și sintetică a performanțelor unui sistem optic.
- ❑ etapa următoare a vizat studiul influenței cumulate a erorilor de execuție și poziție și stabilirea nivelului admis al acestora pentru calitatea sistemelor de complexitate diferită,

În sinteză, rezultatele modelării și simulării efectuate sunt următoarele:

- ❑ abaterea de la valorile nominale ale razelor și grosimilor (dar în mult mai mică măsură) afectează mai ales puterea sistemelor optice. Calitatea imaginii este afectată numai în sensul că abaterea de la distanța focală ideală implică o deplasare axială a planului de referință. Eroarea poate fi compensată pe standul de verificare finală a calității sistemului prin defocusare corespunzătoare
- ❑ recomandările privind toleranțele admise pentru raze vizează un domeniu de $(\pm 0.5 \dots 1\pm)\%$ din valoarea nominală pentru orice sistem optic. Prescrierea toleranțelor admise la dimensiunile razelor se face prin indicarea numărului de inele de interferență vizibile prin aspectare în lumină albă. Numărul acestora, la aceeași abatere procentuală a razei, depinde de valoarea nominală și gabaritul radial al lentilei, ceea ce implică un calcul exact al acestui număr pentru fiecare dioptru, în mod particular. Recomandările din literatură pot avea un caracter pur orientativ; în unele cazuri se pot dovedi inutile restrictive și în alte cazuri – incorecte prin permisivitate excesivă. Ca regulă foarte generală, o rază de valoare mică, a unei lentile de apertură mică și o rază de valoare mare a unei lentile cu deschidere mare, la aceeași abatere procentuală, determină un număr foarte diferit de inele de interferență.
- ❑ grosimea lentilelor afectează în mică măsură puterea sistemelor optice și cu un grad foarte scăzut calitatea imaginii, astfel încât sunt admise toleranțe mari (de până la $\pm 10\%$ sau, în unități de lungime, de ordinul $(\pm 0.1 \dots 0.2\pm)$ mm

- ❑ calitatea imaginii este afectată de descentrarea dioptrilor cu o intensitate medie, dar este drastic diminuată de înclinarea dioptrilor
- ❑ înclinarea dioptrilor poate fi controlată și corectată numai pe standuri optice, care realizează alinierea sistemelor și, din punct de vedere mecanic, asigură suprapunerea axelor geometrică și optică prin debordare
- ❑ debordarea este o operație mecanică asimilabilă cel mult unei strunjiri de finisare, astfel încât la ajustajul prevăzut pentru fixarea în montură trebuie avut în vedere că piesa care poate fi mai precis prelucrată este cea mecanică, metalică, finisabilă prin rectificare
- ❑ descentrarea sistemelor optice provine mai ales datorită jocului dintre montură și piesele optice
- ❑ prescrierea ajustajului depinde de gabaritul componentelor optice, care impun abateri superioare și inferioare în conformitate cu sistemul standardizat de toleranțe și ajustaje
- ❑ cele mai mici descentrări reziduale, datorate montajului cu joc, rezultă pentru ajustaje de tipul H6/e7 sau H6/f6, dar precizia de execuție pe care o presupune realizarea lor depinde de tehnologia disponibilă
- ❑ descentrările recomandate, indiferent de numărul dioptrilor, sunt de ordinul (0.01...0.02)mm. Valorile mai scăzute recomandate de literatură sunt nerealiste din punct de vedere al posibilităților practice de realizare
- ❑ înclinările admise variază între 10" și 1° și, cu necesitate trebuie distribuite conform cerințelor fiecărui sistem, pe dioptri, a căror importanță relativă, din acest punct de vedere nu urmărește o regulă ușor de formulat
- ❑ concluzia generală conduce la necesitatea studiului prin simulare a fiecărei aplicații particulare, ca mod unic de stabilire rațională a abaterilor admise pentru fiecare dioptru, din toate punctele de vedere. Urmărirea recomandărilor generale poate conduce la restricții excesive, inutile și costisitoare sau la permisivitate care se reflectă direct în scăderea calității imaginii.

Prezentul capitol conține contribuții originale ale autoarei, printre care se pot enumera și cele ce urmează:

- ❑ proiectarea unui amplu și cuprinzător studiu al influenței erorilor de execuție și montaj prin modelare și simulare matematică, utilizând un puternic instrument de lucru oferit de programul specializat OSLO LT
- ❑ desfășurarea analizei pe sisteme optice limitate la difracție; sistemul cel mai simplu care poate îndeplini această condiție este dubletul acromat. Astfel studiul a vizat un astfel de dublet și a fost completat cu analiza unui sistem mai complex format din șase dioptri, pentru a pune în evidență importanța numărului de dioptri care

alcătuiesc sistemul

- studiul influenței individuale și a efectelor cumulate ale tuturor erorilor de execuție și montaj posibile: abateri dimensionale ale razelor și grosimilor, descentrarea și înclinarea dioptrilor și componentelor singulare sau a subansamblurilor lipite
- stabilirea efectului fiecărui parametru declarat ca variabilă în procesul de fabricație asupra caracteristicilor sistemului optic: astfel, a rezultat că erorile de execuție afectează cu precădere puterea sistemului, cu implicații indirecte asupra calității imaginii prin defocusarea consecutivă modificării focalei; a rezultat, de asemenea, că erorile de montaj diminuează puternic și cu un gradient ridicat de creștere a influenței toți parametrii de calitate a imaginii
- recomandarea unor valori practice sau a metodei exacte care să particularizeze abaterile maxime admise pentru erorile de execuție; cea mai importantă observație vizează dependența complexă a numărului de inele de interferență de valoarea nominală a razei, abaterea efectivă exprimată în unități de lungime și gabaritul radial al lentilei
- recomandarea valorilor teoretic necesar a fi impuse erorilor de montaj și discutarea posibilităților realiste de prescriere a unor ajustaje, care să poată fi realizate practic prin tehnologiile specifice prelucrării suprafeței exterioare a componentelor optice și a alezajelor conjugate ale monturii
- sublinierea observației generale că numărul de dioptri impune o restrângere a abaterilor admise pentru toate tipurile de erori
- exprimarea concluziei generale că cel mai indicat mod de a prescrie corect toleranțele pentru ansamblurile optomecanice este acela de a efectua simulări pentru fiecare aplicație concretă, nefiind posibilă deducerea analitică a unei relații de compunere a efectelor, atât datorită numărului ridicat de variabile, cât și a sensului de influență a acestora, care de la caz la caz poate fi mai mult sau mai puțin intens sau chiar de sens contrar.

Bibliografie:[C1], [C5], [G1], [G3], [G7], [G12], [J1], [M1], [N3], [O2], [P8], [S2], [S3], [S6], [S15], [W14], [W22]

4. DETERMINĂRI EXPERIMENTALE

4.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Analiza sistemelor optice a atins un nivel de rafinament și profunzime care îi asigură statutul de instrument puternic, precis și sigur de apreciere a calității imaginii. Modelarea și simularea matematică permit evaluarea rapidă a unei game foarte largi și diverse de parametri de calitate, cu posibilitatea decelării unor influențe, care, practic, nu pot fi separate. Determinările experimentale, la nivelul de precizie al rezultatelor simulării, sunt dificil, dacă nu chiar imposibil de realizat practic. Măsurarea cantitativă a unor parametri de calitate a sistemelor optice, cum ar fi aberațiile, rezoluția, contrastul sau funcția optică de transfer necesită instalații sofisticate, scumpe și specializate. În principiu, punerea în evidență a fiecărui indicator de calitate, eventual a unui set restrâns de parametri presupune un echipament cu o schemă special dedicată. Chiar dacă această condiție este îndeplinită, din punct de vedere practic este greu de realizat un montaj care să materializeze exclusiv condițiile de punere în evidență a unui singur indicator de calitate (de exemplu numai aberația sferică longitudinală, coma tangențială, distorsiunea, rezoluția etc.). În condiții experimentale, se manifestă toate erorile de formare a imaginii, de execuție și montaj, iar efectul particular al fiecărui parametru de influență nu poate fi evidențiat cu acuratețe. Calitatea imaginii rămâne, prin excelență, o caracteristică globală determinată ca o sumă algebrică și ponderată a unui număr mare de termeni.

Având în vedere cele de mai sus, se propune un studiu experimental care să ilustreze, cel puțin principial și calitativ rezultatele simulărilor din capitolul anterior. Concluziile acestuia arătau că cea mai importantă influență asupra calității imaginii o au erorile de montaj, cu precădere, înclinarea componentelor.

S-a proiectat și realizat un stand experimental, care permite analiza aberațiilor geometrice – aberația sferică axială, aberația sferică transversală, coma și curburile astigmatice de câmp – funcție de înclinarea unei lentile convergente în raport cu axa optică.

4.2. DESCRIEREA STANDULUI

Determinările experimentale s-au efectuat pe un stand proiectat și realizat de către autoare, iar măsurările s-au desfășurat în Laboratorul de discipline optice al Facultății de Mecanică Timișoara.

Standul, prezentat schematic în figura 4.1 și ilustrat prin imaginea din figura 4.2, utilizează, în principal, elementele caracteristice unui banc optic. Așa cum rezultă din figura

4.1, pe ghidajul bancului optic culisează suportii de fixare a elementelor incluse în schema optică: sursa de radiație, condensorul, diafragma cu fante, lentila de analizat și ecranul de vizualizare a imaginii.

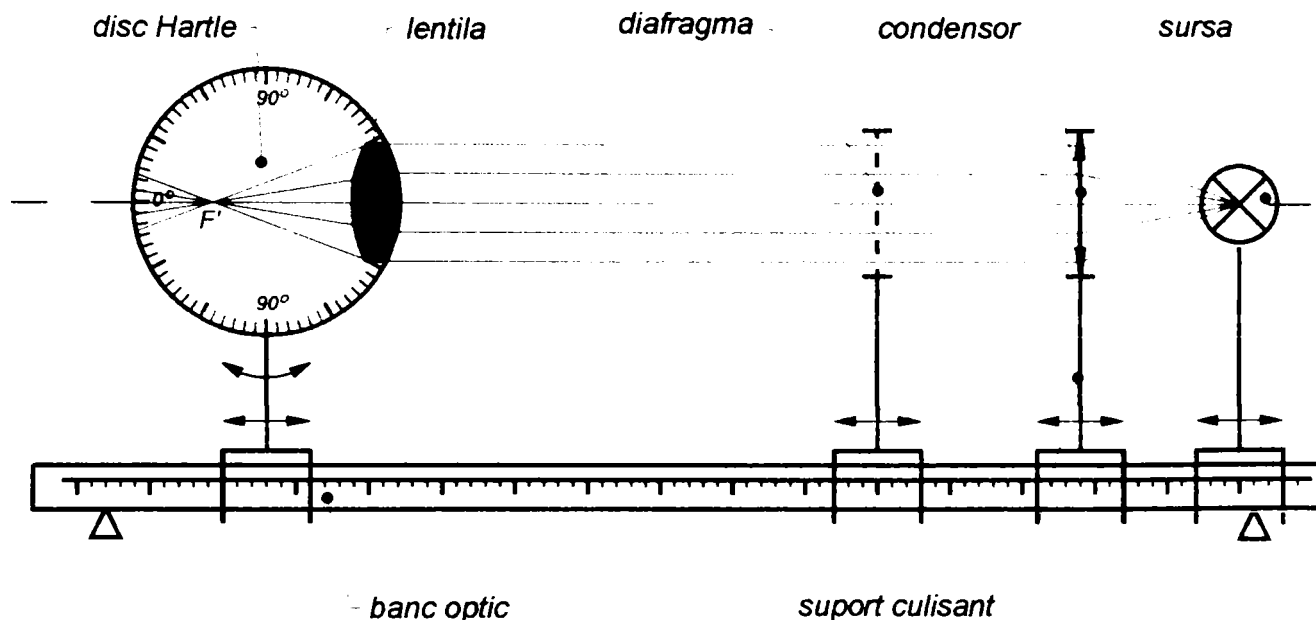


Fig.4.1. Schema standului de măsurare a aberațiilor geometrice funcție de înclinarea lentilei

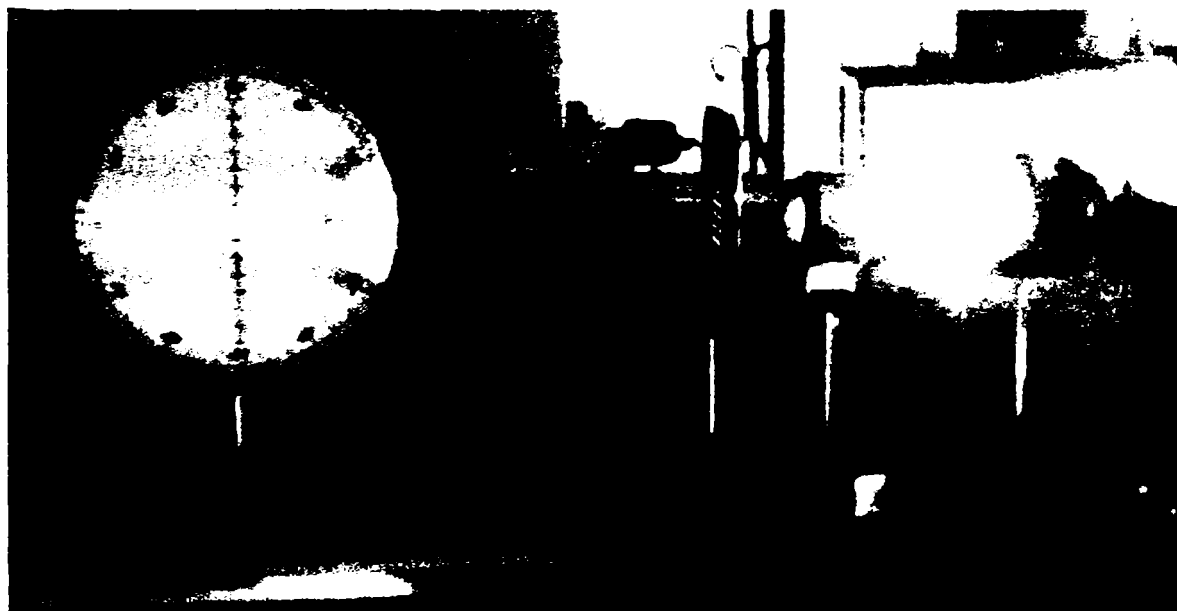


Fig.4.2. Stand de măsurare a influenței înclinării lentilei asupra aberațiilor geometrice

S-a utilizat o sursă de radiație integrală (o lampă cu filament alimentată la 12 V c.a.), plasată în focalul unui condensor cu $f' = 100$ mm și apertură mare ($f'/2.5$), bine corectat la aberații geometrice și cromatice.

În fața fascicului paralel transmis de condensor se află o diafragmă specială, proiectată, constituită din cinci fante liniare orizontale, care fragmentează fascicului incident,, materializând raza pupilară principală, două raze corespunzătoare jumătății aperturii și razele

marginale.

Lentila analizată are deschiderea $\Phi 40$, este de formă echiconvexă și are puterea de 10 dpt. ($f' = 100$ mm).

Lentila se fixează prin intermediul unui suport magnetic pe un disc Hartle, metalic, care are rolul de ecran pe care se vizualizează imaginea și, în același timp, de instrument de măsurare a unghiului de înclinare a lentilei.

Suportii de fixare a acestor elemente au o construcție mecanică astfel încât să permită reglarea poziției pe verticală a componentei susținute și deplasarea axială pe ghidajul bancului optic, fiind astfel asigurată posibilitatea alinierii și centrării optice a sistemului.

În absența altor elemente mecanice de limitare a aperturii, deschiderea sistemului este determinată de gabaritul radial al lentilei. În acest caz deschiderea sa reprezintă și mărimea pupilei de intrare. Fasciculul incident fiind paralel cu axa optică, rezultă că raza pupilară principală coincide cu aceasta.

Figurile de refracție obținute pe discul Hartle au fost preluate cu o cameră foto digitală având rezoluția de 3 megapixeli. Prelucrarea acestor imagini permit aprecieri calitative și cantitative privind consecințele înclinării lentilei.

Pentru desfășurarea determinărilor experimentale s-a procedat la alinierea optică a montajului, cu așezarea lentilei în poziția ideală, perpendiculară pe axa optică (unghiul de înclinare $\alpha=0^\circ$). Prin rotirea controlată a discului Hartle s-au simulat erori de montaj, cu înclinarea planelor principale ale lentilei în domeniul $\alpha=[0^\circ \dots 10^\circ]$. Pentru fiecare poziție a lentilei s-a preluat o imagine digitală a discului, pe care se vizualizează traseul celor cinci raze după refracția prin componenta optică.

Imaginile au fost prelucrate în vederea măsurării aberației sferice axiale (ds'), aberației sferice transversale (ds'_k), curburilor astigmatice tangențială și sagitală de câmp (z_t și z_s), razei Petzval (r_{ptz}) și comei tangențiale (k_t).

În figura 4.3 este prezentă o imagine ilustrativă pentru modul în care au fost apreciate valorile aberațiilor bine puse în evidență în prezența erorii de poziție a lentilei.

Determinările numerice s-au bazat pe interpolarea valorii lungimii segmentelor corespunzătoare aberațiilor, pe imaginile preluate care conțineau implicit factorul de scară prin gradațiile de pe disc.

Inițial s-a determinat poziția de referință a focarului paraxial F' pentru cazul așezării corecte a lentilei ($\alpha=0^\circ$). A rezultat frontifocala imagine $s'_{F'} = 97$ mm și $f' = 100$ mm (fig.4.4). Focarul paraxial astfel determinat a fost considerat ca element de referință al planului imagine pentru măsurările ulterioare. Raza Petzval de referință s-a calculat conform relației:

$$r_{ptz.ref} = -\frac{n}{\Phi} = -160 \text{ mm} . \quad (4.1)$$

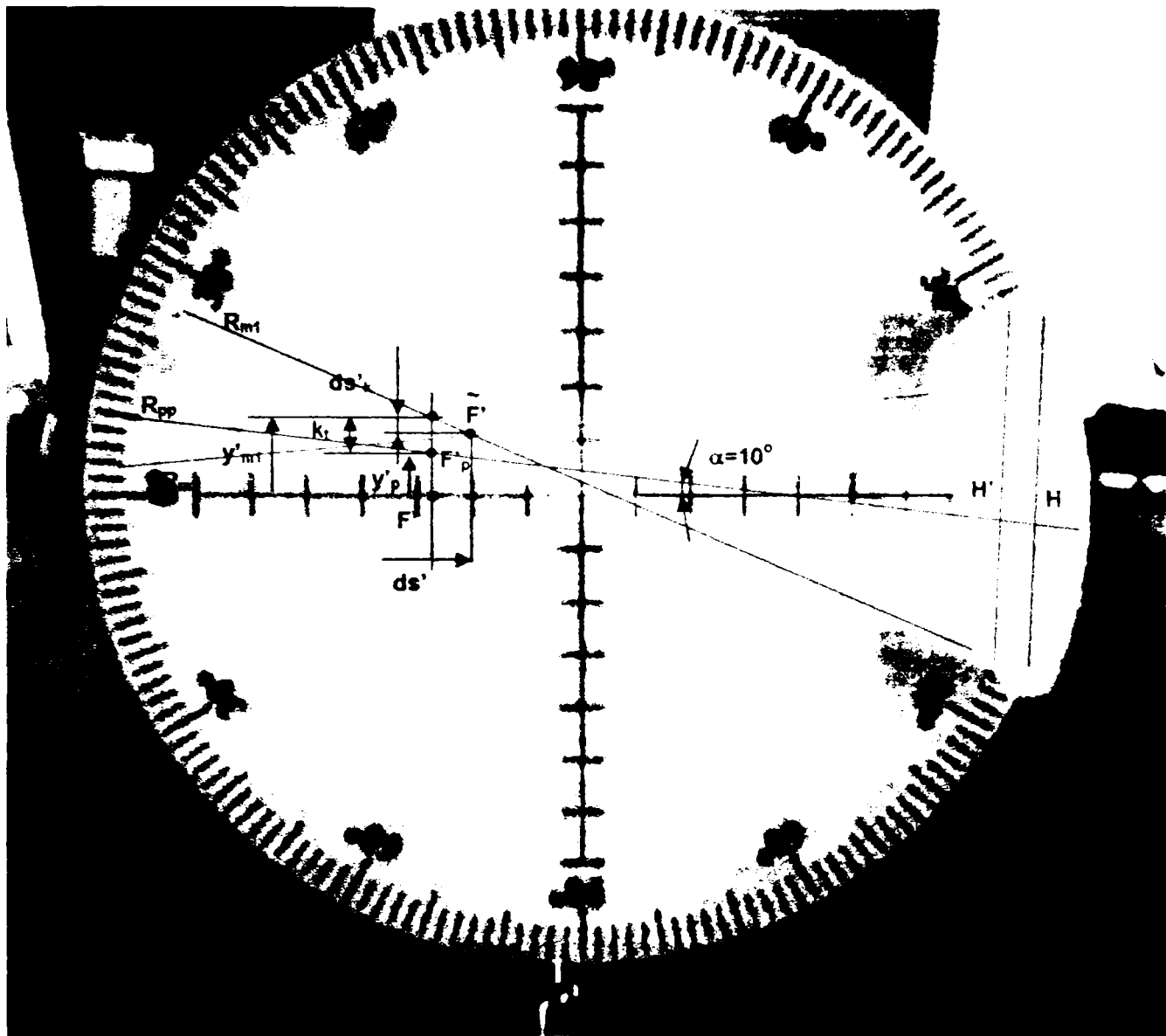


Fig. 4.3. Discul Hartle pe care se vizualizează fasciculul prin lentila înclinată cu evidențierea aberațiilor geometrice

Pentru pozițiile înclinate ale lentilei s-a considerat că focarul extraaxial cel mai scurt se află la intersecția razelor marginale (\tilde{F}' în figura 4.3). Diferența dintre abscisa acestui focar și frontifocala imagine determină aberația sferică axială:

$$ds' = s'_{\tilde{F}'} - s'_{F'} . \tag{4.2}$$

Aberația sferică transversală rezultă indirect funcție de componenta axială:

$$ds'_k = ds' \cdot \text{tg} \alpha . \tag{4.3}$$

La aceeași abscisă $s'_{F'}$ se află focarul F'_p pe raza pupilară principală înclinată. Ordonata acestuia determină mărimea paraxială a imaginii y'_p , iar ordonatele punctelor de intersecție ale razelor marginale stabilesc mărimea imaginilor extraaxiale \tilde{y}'_{m1} și \tilde{y}'_{m2} . Diferența dintre înălțimea extraaxială maximă (corespunzătoare razei marginale R_{m1}) și

înălțimea imaginii determinate de raza pupilară principală R_{pp} reprezintă coma tangențială:

$$k_t = \tilde{y}'_{m1} - y'. \quad (4.4)$$

Coma sagitală rezultă indirect, cu ajutorul relației cunoscute:

$$k_s = \frac{1}{3}k_t. \quad (4.5)$$

Scurtarea distanțelor focale determină creșterea curburii sferei Petzval. Considerând că variația razei frontului de undă imagine este numeric egală cu aberația sferică axială rezultă raze Petzval de forma:

$$r_{ptz\alpha} = -\frac{n}{\Phi} = -\frac{n}{\frac{1}{f' - ds'}}. \quad (4.6)$$

Diferența dintre raza Petzval de referință și cea calculată pentru lentila înclinată reprezintă curbura astigmatică tangențială:

$$Z_t = r_{ptz\text{ref}} - r_{ptz\alpha}. \quad (4.7)$$

Curbura astigmatică sagitală de câmp rezultă indirect cunoscând relația:

$$Z_s = \frac{1}{3}Z_t. \quad (4.8)$$

4.3. REZULTATE EXPERIMENTALE

În figurile 4.4...4.9 sunt prezentate, selectiv, imaginile obținute pe discul Hartle pentru înclinări ale lentilei cu valori $\alpha = 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ$.

Pentru poziția corectă a lentilei (fig. 4.4), cu planele principale perpendiculare pe axa optică, se observă simetria figurii de refracție și, practic, intersecția tuturor celor cinci raze într-un singur punct, corespunzător focarului imagine al lentilei.

Înclinarea lentilei are ca efect frângerea traseului razei pupilare principale, pierderea simetriei figurii în raport cu aceasta, scurtarea distanței focale și deplasarea focarului în afara axei optice. Aceste efecte sunt tot mai evidente pe măsură ce unghiul de înclinare crește, așa cum se poate observa din figurile 4.5...4.9.

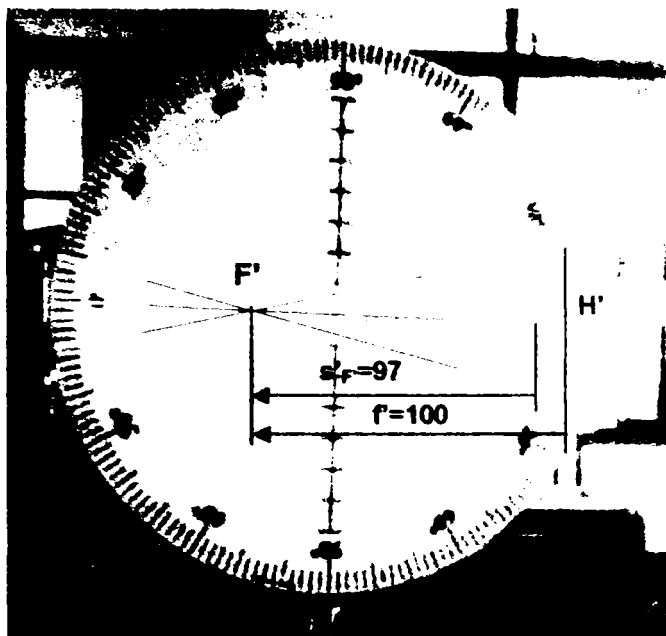


Fig.4.4. Imaginea razelor refractate prin lentila cu înclinarea $\alpha = 0^\circ$

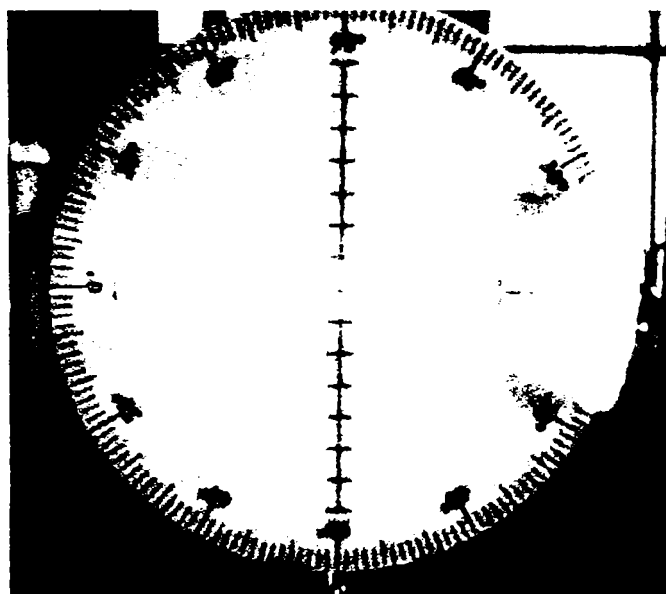


Fig.4.5. Imaginea razelor refractate prin lentila cu înclinarea $\alpha = 2^\circ$

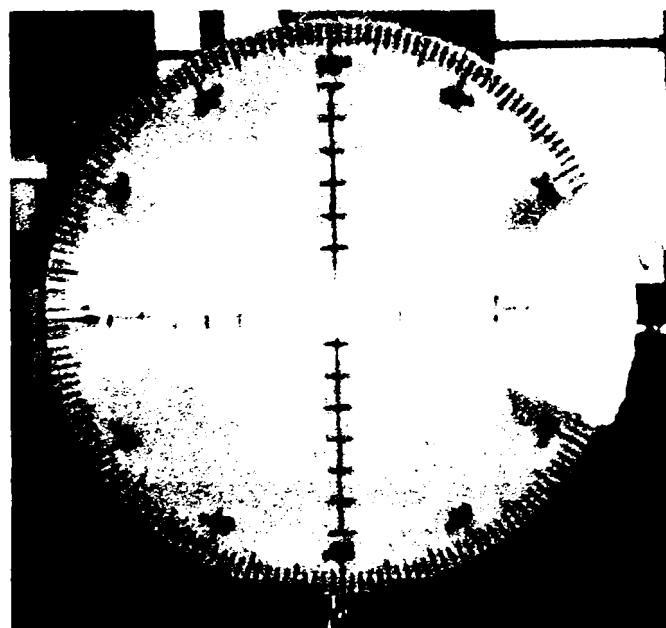


Fig.4.6. Imaginea razelor refractate prin lentila cu înclinarea $\alpha = 4^\circ$

Pe aceste figuri de refracție deformate pot fi identificate elemente geometrice pe baza cărora se definesc principalele aberații geometrice. Astfel s-au măsurat direct următoarele mărimi:

- abscisa focarului extraaxial determinat de intersecția razelor marginale refractate
- înălțimea imaginii extraaxiale stabilită la intersecția razei marginale cu planul imagine paraxial de referință
- înălțimea imaginii determinate de raza pupilară principală în planul imagine de referință

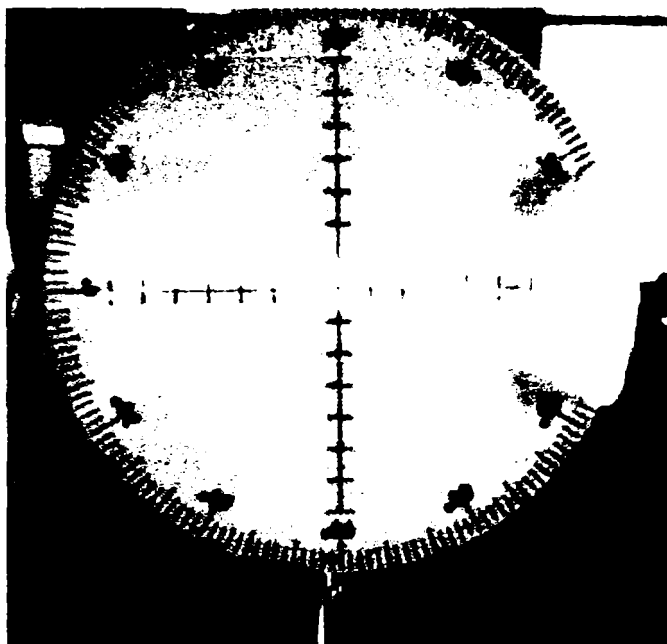


Fig. 4.7. Imaginea razelor refractate prin lentila cu înclinarea $\alpha = 6^\circ$

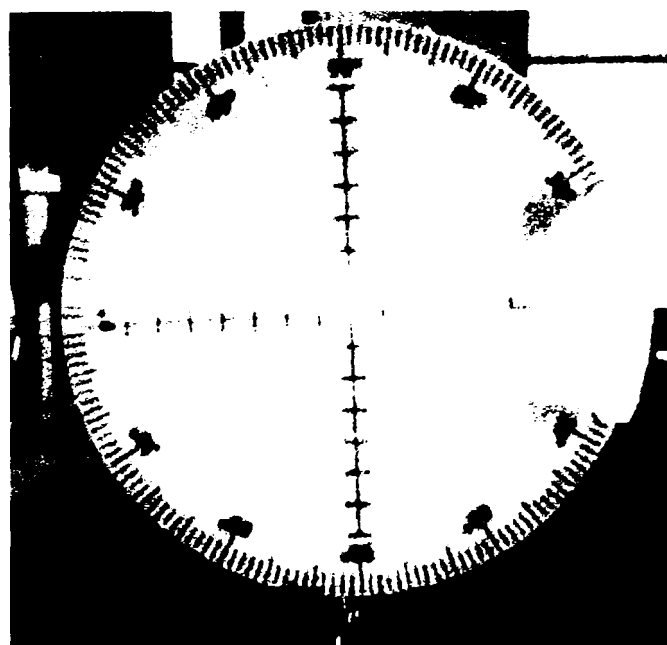


Fig. 4.8. Imaginea razelor refractate prin lentila cu înclinarea $\alpha = 8^\circ$

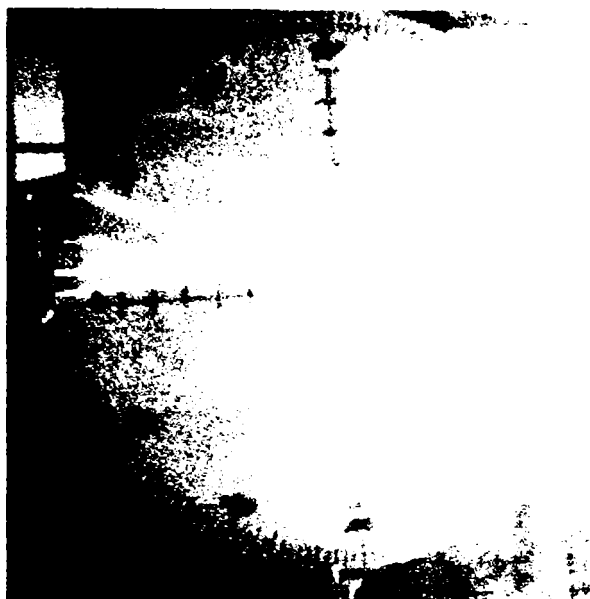


Fig.4.9. Imaginea razelor refractate prin lentila cu înclinarea $\alpha = 10^\circ$

În tabelul 4.1 sunt redată rezultatele măsurărilor obținute prin prelucrarea imaginilor preluate. Coloanele 2, 3 și 4 conțin valorile măsurărilor directe, iar în coloanele următoare sunt înscrise valorile numerice ale aberațiilor definite cu relațiile (4.1)...(4.8).

Tabelul 4.1

alfa [o]	s'_F [mm]	\tilde{y}' [mm]	y'_p [mm]	$ ds' $ [mm]	$ ds'_k $ [mm]	k_t [mm]	$ r_{Ptz} $ [mm]	$ z_t $ [mm]	distors [%]
0	97.00	0.00	0.00	0	0	0	160.00	0	0
1	96.35	1.00	0.60	0.65	0.01	0.40	154.16	5.84	66.67
2	95.50	2.50	1.25	1.50	0.05	1.25	152.80	7.20	60.00
3	95.15	3.80	2.45	1.85	0.10	1.35	152.24	7.76	55.10
4	94.75	5.25	3.45	2.25	0.16	1.80	151.60	8.40	52.17
5	93.40	6.50	4.25	3.60	0.31	2.25	149.44	10.56	52.94
6	92.75	8.00	5.00	4.25	0.45	3.00	148.40	11.60	60.00
7	91.50	9.75	6.40	5.50	0.68	3.35	146.40	13.60	52.34
8	90.25	11.00	7.00	6.75	0.95	4.00	144.40	15.60	57.14
9	89.70	12.25	7.60	7.30	1.15	4.65	143.52	16.48	61.18
10	89.11	13.50	8.50	7.85	1.38	5.00	142.57	17.43	58.82

Variația aberației sferice axiale funcție de înclinarea lentilei, ds' (alfa), este prezentată în figura 4.10. Se observă o creștere accentuată a aberației, care înregistrează un curs ascendent aproximativ liniar. Pe același grafic este trasată și dreapta de regresie a șirului bidimensional ds' -alfa. Este redată și ecuația acestei drepte pentru a pune în evidență panta mare a acesteia, ceea ce semnifică o degradare rapidă a calității imaginii la variații mici ale unghiului de înclinare.

Reprezentarea s-a trasat utilizând valori absolute, aberația fiind formal negativă pentru componenta convergentă.

Aberația sferică transversală are valori mai mici decât cea axială și, în raport cu

înclinarea, are o creștere inițial slabă urmată de o evoluție rapidă, ceea ce conduce la o alură de tip parabolic (fig.4.11). Aberația sferică transversală afectează în mod deosebit claritatea imaginii. Creșterea sa conduce rapid la descalificarea sistemelor optice.

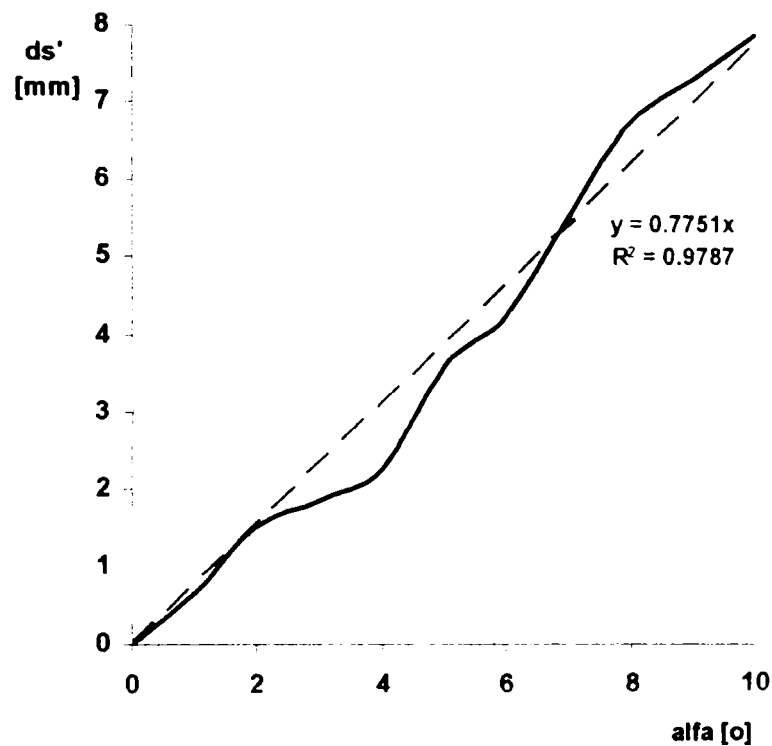


Fig.4.10. Variația aberației sferice axiale cu înclinarea lentilei

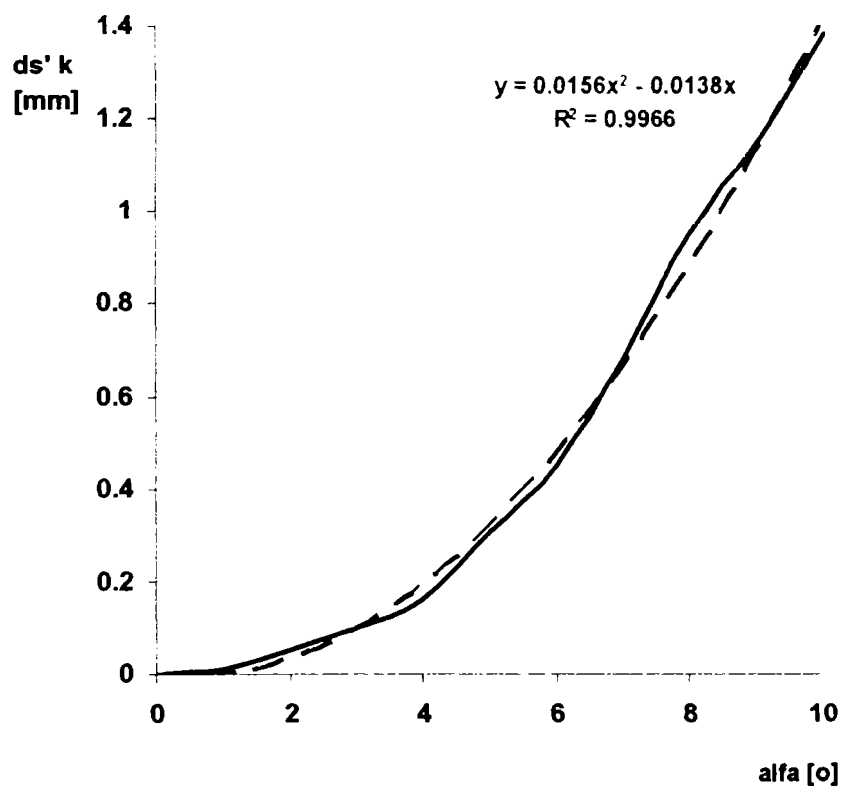


Fig.4.11. Variația aberației sferice transversale cu înclinarea lentilei

Coma, care are influență asupra clarității dar mai ales asupra distribuției iluminării în

planul imagine, are o creștere aproximativ liniară cu înclinarea lentilei, așa cum rezultă din figura 4.12. Creșterea sa este accelerată la înclinări mari, efect bine pus în evidență în figurile 4.8 și 4.9, în care se observă clar diferența dintre înălțimea imaginii extraaxiale determinate de razele marginale și înălțimea corespunzătoare razei pupilare principale.

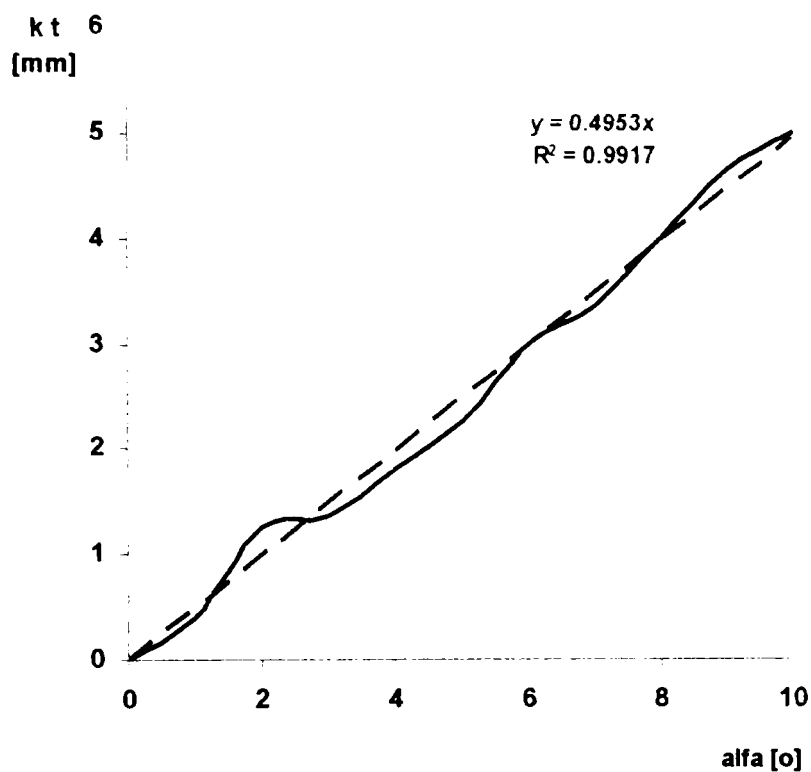


Fig.4.12. Variația comei transversale cu înclinarea lentilei

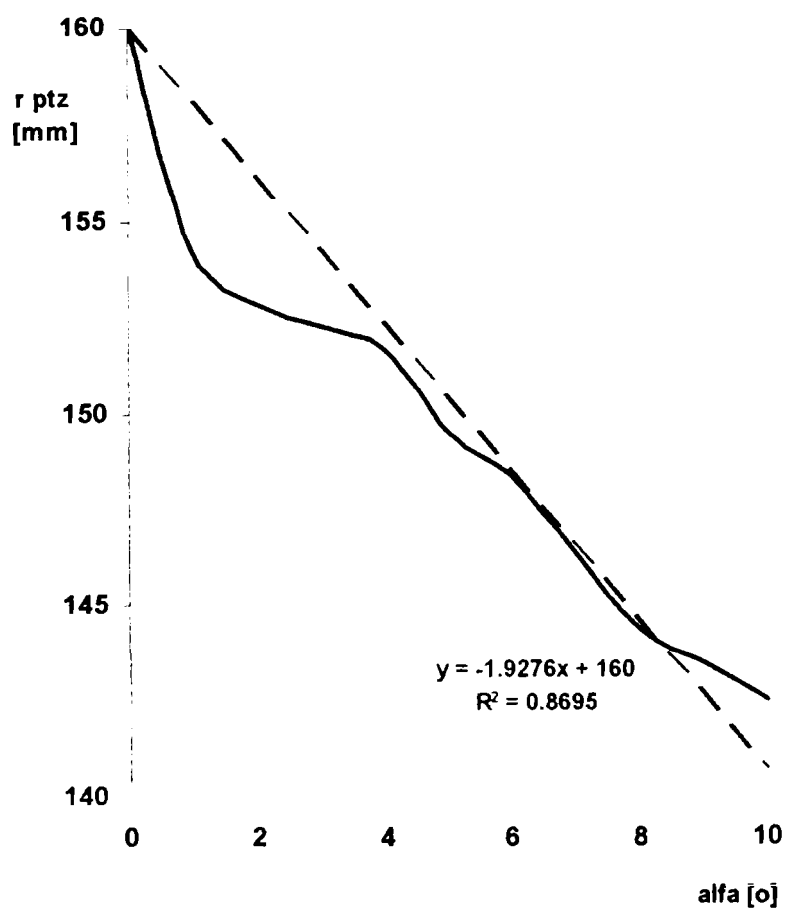


Fig.4.13. Variația razei Petzval cu înclinarea lentilei

În figura 4.13 este redată scăderea aproximativ liniară a razei Petzval a frontului de undă imagine. Scăderea acestei raze este echivalentă cu o curbare suplimentară a frontului de undă și conduce la o accentuare a curburilor astigmatice de câmp.

În figura 4.14 se poate urmări variația curburii astigmatice tangențiale de câmp. Aceasta are un curs sinuos, care poate fi bine aproximat printr-o parabolă de gradul trei.

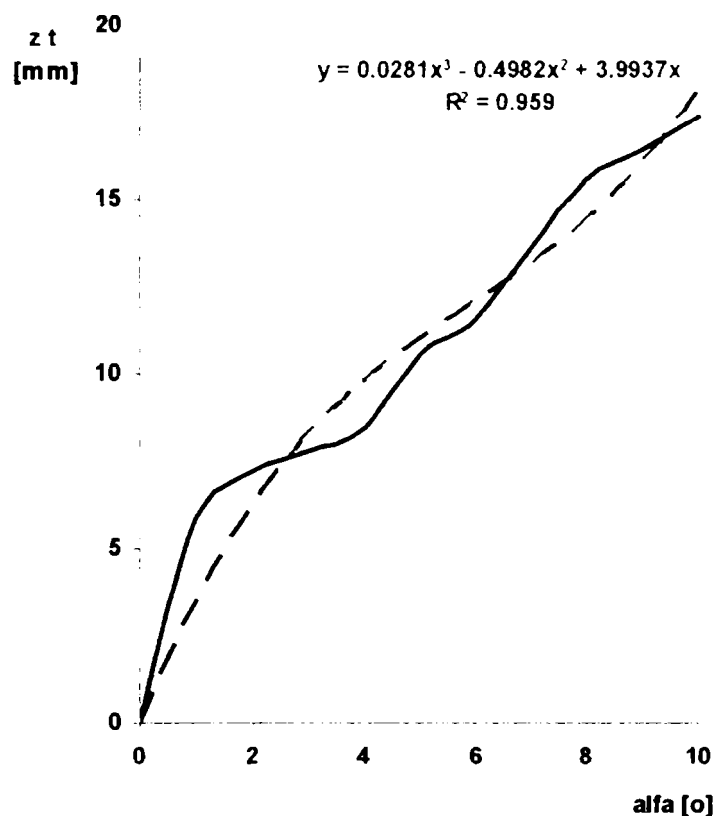


Fig.4.14. Variația curburii astigmatice tangențiale de câmp cu înclinarea lentilei

Determinările descrise și discutate anterior s-au desfășurat în lumină albă. Lentila singulară utilizată pentru analiză are aberații cromatice negative care pot fi sesizate pe imaginile prezentate prin colorarea ușoară în roșu a fasciculelor înguste selectate de fantele diafragmei, după refracția prin materialul lentilei (policarbonat cu $n=1.6$).

Efectul înclinării lentilei poate fi sesizat cu claritate și în lumină monocromatică, dat fiind că nu există nici o condiționare spectrală în manifestarea aberațiilor geometrice. Acestea au variații ușor diferite funcție de radiația monocromatică luată în considerare. Diferențele au valori mici datorită dispersiei principale care variază în intervalul (0.01...0.1) pentru orice material optic. Abscisele și ordonatele spectrale diferite ale punctelor imagine sunt definite ca aberații cromatice și fac obiectul unui studiu separat. Erorile de execuție și montaj a componentelor optice augmentează valorile aberațiilor geometrice reziduale și numai în cazul unei analize din perspectiva spectrală a acestora, afectează și aberațiile cromatice.

Aberațiile geometrice determinate de înclinarea lentilei, în lumină monocromatică, au

fost puse în evidență experimental pe același stand prin atașarea în montura condensoului a unor filtre colorate.

Se prezintă în continuare imaginile preluate utilizând radiația de culoare verde (filtru pentru $\lambda=546.074$ corespunzător liniei spectrale de referință "e"). În aceleași condiții experimentale descrise pentru lumina albă, s-au obținut pentru radiația verde imaginile redate în figurile 4.15...4.20.

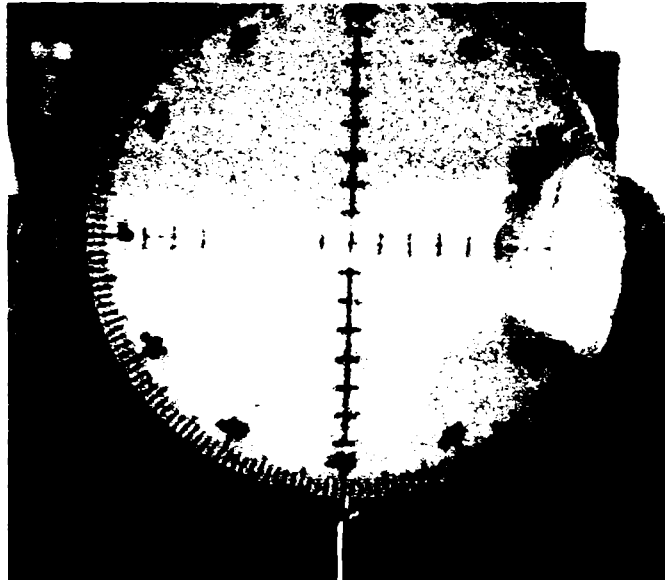


Fig.4.15. Imaginea razelor refractate prin lentila cu înclinarea $\alpha = 0^\circ$ pentru radiația monocromatică verde ($\lambda=546.074 \text{ nm}$)

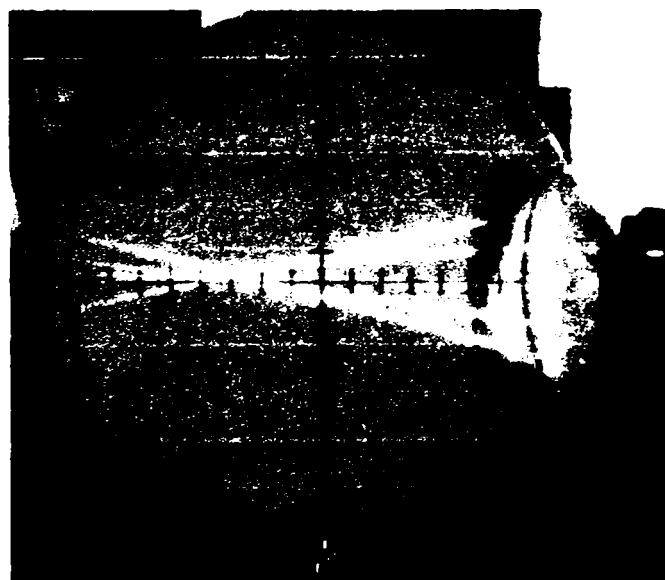


Fig.4.16. Imaginea razelor refractate prin lentila cu înclinarea $\alpha = 2^\circ$ pentru radiația monocromatică verde ($\lambda=546.074 \text{ nm}$)



Fig.4.17. Imaginea razelor refractate prin lentila cu înclinarea $\alpha = 4^\circ$ pentru radiația monocromatică verde ($\lambda=546.074$ nm)

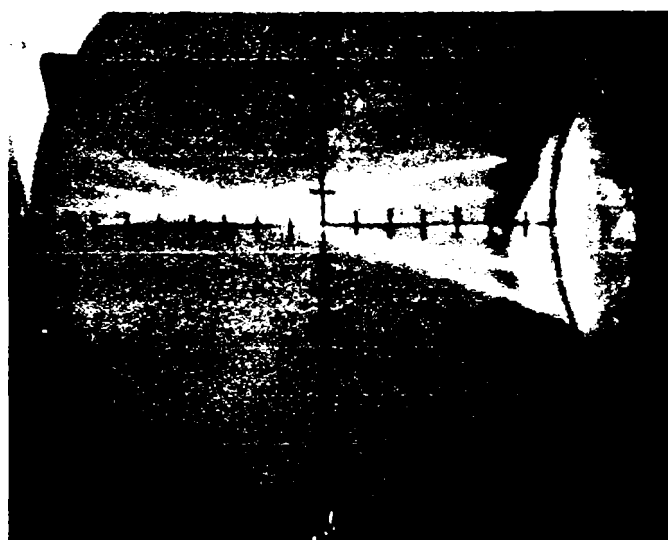


Fig.4.18. Imaginea razelor refractate prin lentila cu înclinarea $\alpha = 6^\circ$ pentru radiația monocromatică verde ($\lambda=546.074$ nm)

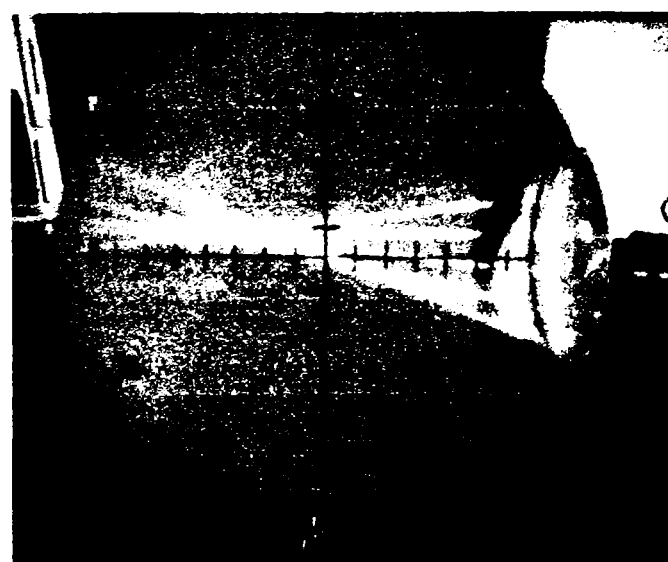


Fig.4.19. Imaginea razelor refractate prin lentila cu înclinarea $\alpha = 8^\circ$ pentru radiația monocromatică verde ($\lambda=546.074$ nm)



Fig.4.20. Imaginea razelor refractate prin lentila cu înclinarea $\alpha = 10^\circ$ pentru radiația monocromatică verde ($\lambda=546.074 \text{ nm}$)

Aceleași măsurări s-au efectuat utilizând un filtru pentru obținerea radiației de referință roșii cu $\lambda=643.850 \text{ nm}$.

Imaginile preluate în aceleași condiții experimentale sunt prezentate în figurile 4.21...4.26.

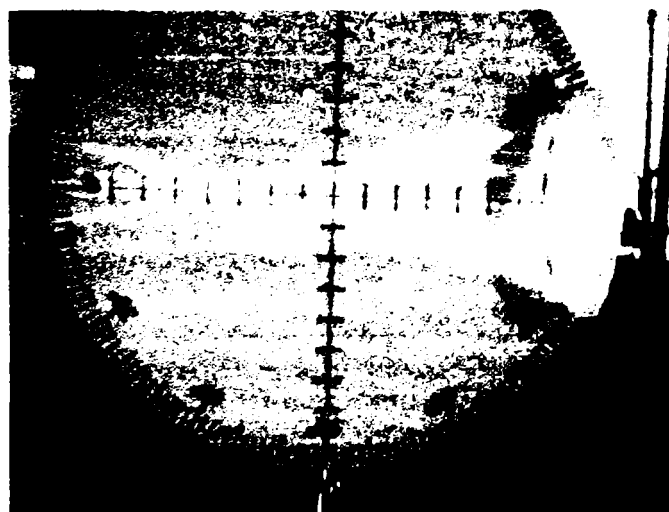


Fig.4.21. Imaginea razelor refractate prin lentila cu înclinarea $\alpha = 0^\circ$ pentru radiația monocromatică roșie ($\lambda=643.850 \text{ nm}$)

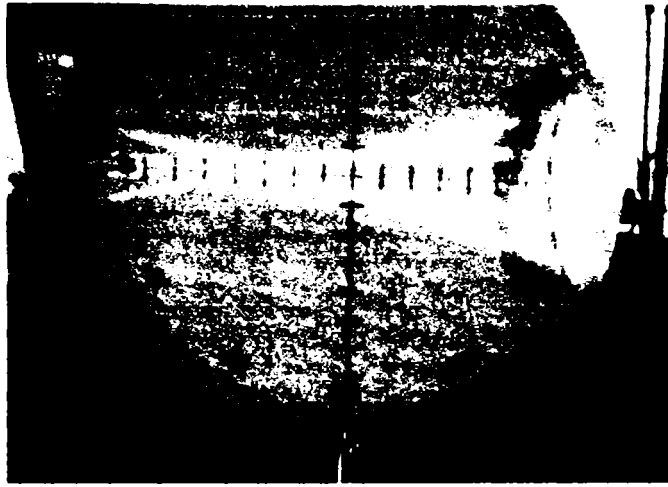


Fig.4.22. Imaginea razelor refractate prin lentila cu înclinarea $\alpha = 2^\circ$ pentru radiația monocromatică roșie ($\lambda=643.850 \text{ nm}$)

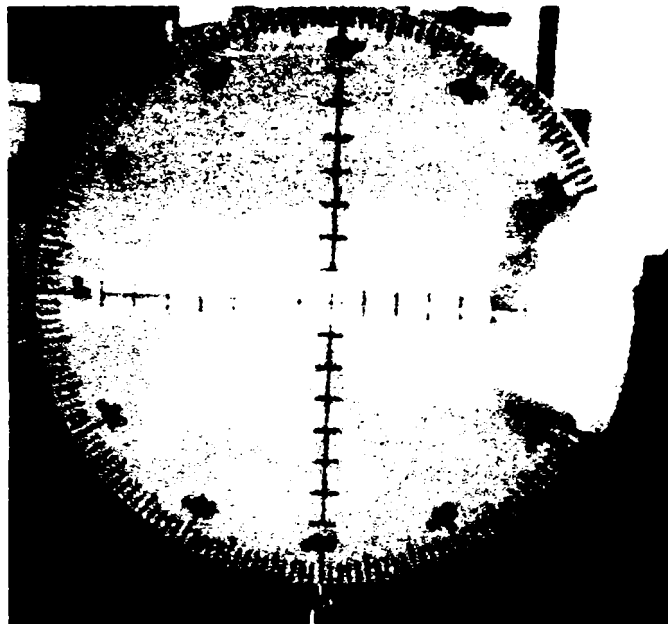


Fig.4.23. Imaginea razelor refractate prin lentila cu înclinarea $\alpha = 4^\circ$ pentru radiația monocromatică roșie ($\lambda=643.850 \text{ nm}$)

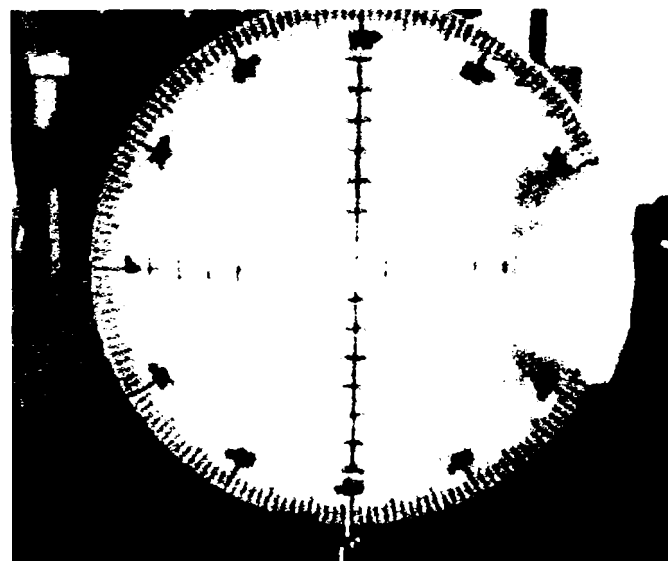


Fig.4.24. Imaginea razelor refractate prin lentila cu înclinarea $\alpha = 6^\circ$ pentru radiația monocromatică roșie ($\lambda=643.850 \text{ nm}$)

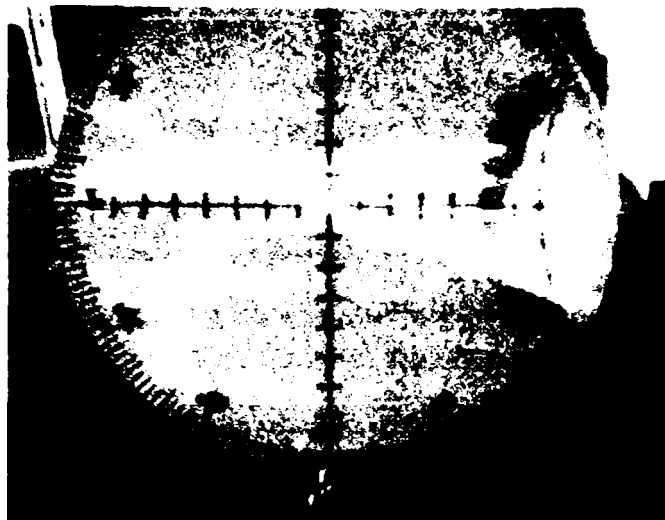


Fig.4.25. Imaginea razelor refractate prin lentila cu înclinarea $\alpha = 8^\circ$ pentru radiația monocromatică roșie ($\lambda=643.850 \text{ nm}$)

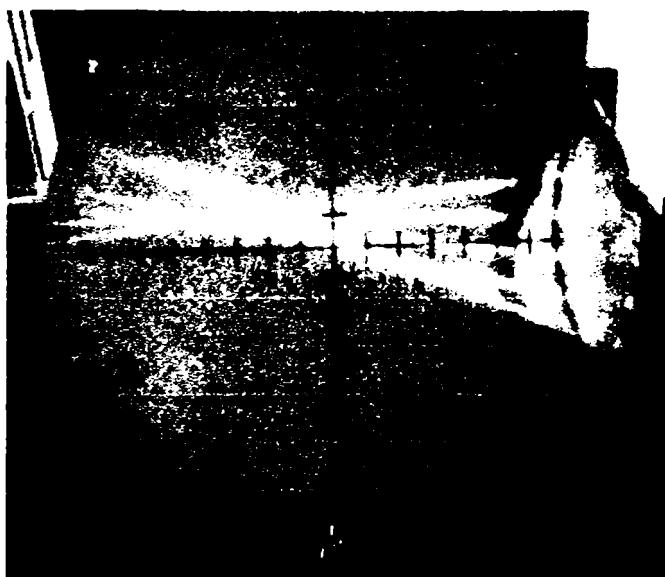


Fig.4.26. Imaginea razelor refractate prin lentila cu înclinarea $\alpha = 10^\circ$ pentru radiația monocromatică roșie ($\lambda=643.850 \text{ nm}$)

4.4. CONCLUZII

În prezentul capitol au fost descrise determinări experimentale care să ilustreze practic problemele tratate teoretic, prin modelare și simulare în capitolul anterior. Având în vedere concluzia care a rezultat în urma simulărilor și anume aceea că cele mai influente erori asupra calității imaginii sunt cele de montaj și în special înclinarea componentelor în raport cu axa optică, s-a proiectat un stand destinat încercărilor care să pună în evidență acest aspect.

Experimentul s-a desfășurat în Laboratorul de discipline optice al Facultății de Mecanică, pe un stand proiectat și realizat prin completarea și adaptarea echipamentelor preexistente, de către autoare.

Pentru analiză s-a utilizat o lentilă convergentă executată din policarbonat ($n=1.60$),

de formă echiconvexă și deschidere $\Phi 40$.

Măsurările s-au efectuat în lumină albă și monocromatică (pentru linia verde cu $\lambda=546.074\text{nm}$ și respectiv roșie cu $\lambda=643.850\text{nm}$).

Lentila, aliniată optic cu dispozitivul de iluminare și diafragma cu fante orizontale, a fost așezată inițial în poziția corectă, cu planele principale perpendiculare pe axa optică. În această poziție s-au determinat caracteristicile sale de referință ($f'=100\text{mm}$, $s'_F=97\text{mm}$), care au constituit pentru toate măsurările ulterioare repere pentru planul imagine de referință.

În absența înclinării față de axa optică, lentila a fost considerată lipsită de aberații, astfel încât toate aberațiile măsurate sau calculate indirect pot fi admise ca datorate exclusiv înclinării.

Lentila a fost înclinată față de axa optică de referință cu ajutorul unui disc Hartle, care permite atât măsurarea unghiurilor cât și a distanțelor pe direcția axelor z și y .

Pentru evidențierea clară a efectelor, domeniul variabilei unghiulare a fost mai larg decât plaja erorilor uzuale de așezare a unei componente singulare. S-au simulat erori de înclinare a lentilei de până la 10° . Totuși, încercările pot acoperi cazurile sistemelor formate dintr-un șir mai lung de subansambluri optice.

Măsurările directe sau indirecte au permis determinarea numerică a tuturor aberațiilor geometrice axiale, transversale și sagitale:

- aberația sferică longitudinală și transversală
- coma tangențială și sagitală
- curbura de câmp astigmatice tangențială și sagitală
- curbura de câmp (raza sferei Petzval)
- distorsiunea.

Rezultatele obținute prin prelucrarea unor imagini digitale preluate din spațiul imagine, în care au fost vizualizate razele marginale, mediane și raza pupilară principală, au pus în evidență influențe puternice, de tip liniar sau parabolic, al înclinării lentilei asupra tuturor aberațiilor geometrice.

Cele mai importante și rapide creșteri sunt înregistrate, desigur, de aberațiile specifice fasciculelor înclinate, la care raza pupilară principală nu coincide cu axa optică: coma, curbura astigmatice de câmp și distorsiunea.

Determinările experimentale validează concluziile rezultate prin modelarea sistemelor optice și simularea erorilor de montaj.

Printre contribuțiile originale ale autoarei se pot formula următoarele:

- proiectarea unui experiment care să permită evidențierea tuturor aberațiilor geometrice ale sistemelor optice
- proiectarea și realizarea standului experimental
- efectuarea unui număr mare de măsurări cu preluarea unor imagini ale tuturor

cazurilor analizate

- prelucrarea imaginilor digitale și interpretarea parametrilor de calitate a imaginii rezultați direct sau prin calcul.

Bibliografie: [C4], [D2], [G2], [G7], [J2], [L2], [M1], [N4], [N5], [O2], [P2], [P8], [P9], [S2], [S3], [W2]

5. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Prezenta teză se înscrie în aria largă a tematicii creșterii calității în domeniul sistemelor optice și se situează la confluența demersurilor de sinteză și analiză.

Subiectul tezei are la bază observația că tot calculul optic de sinteză și analiză se desfășoară în mod tradițional pentru sisteme optice geometric ideale atât în privința formei și dimensiunilor componentelor, cât și a poziției relative a acestora. Este evident faptul că, în realitate, orice piesă, indiferent de procesul de uzinare, are dimensiuni și forme efective, diferite de cele nominale, ideale. De asemenea, poziția relativă a elementelor și subansamblurilor optice în tubul mecanic, va fi caracterizată de abateri de la centrarea ideală de-a lungul axei optice și de la perpendicularitatea planelor principale pe această axă.

Având în vedere observațiile de mai sus, se formulează următoarele obiective ale tezei:

- Sistematizarea erorilor de execuție și montaj, în scopul decelării tuturor influențelor posibile asupra calității imaginii. Literatura, foarte săracă în tratarea acestui subiect conține abordări generale sau trunchiate. Definirea fiecărui tip de eroare permite modelarea sa numerică și analiza influenței sale prin gradul de corelație și viteza de variație în raport cu un parametru semnificativ de caracterizare a imaginii
- Realizarea unui studiu complex al influenței erorilor de execuție și montaj, individual și cumulativ, prin modelare-simulare numerică pentru entități limitate la difracție din structura sistemelor optice: dubletul lipit și sisteme optice complexe, format din mai mulți dioptri. Se urmărește variația puterii și a RMS OPD (eventual și raportul Strehl) ca cele mai semnificative caracteristici ale sistemului optic în raport cu abaterile razelor, grosimilor la centru, descentrării în plan meridian și înclinării în raport cu axa y , considerate ca cele mai importante elemente de influență
- Rafinarea recomandărilor tabelare existente cu indicații concrete privind abaterile maxime admise pentru raze, grosimi, descentrări și înclinări pentru structurile analizate, în condițiile menținerii calității în domeniul limitat la difracție
- Studiul experimental al erorilor de montaj asupra aberațiilor geometrice.

Primele două capitole ale lucrării prezintă în mod detaliat stadiul actual privind influența erorilor de execuție și montaj asupra calității imaginii, precum și parametrii de apreciere a acesteia, la nivelul celor mai sofisticate criterii actuale.

În rezumat, capitolul al treilea al prezentei lucrări a pus în discuție următoarele probleme:

- stabilirea abaterilor maxime ale dimensiunilor razelor și grosimii lentilelor și ale poziției relative ale dioptrilor astfel încât imaginea formată de sistemul real să păstreze categoria de calitate a sistemului rezultat prin calculul de proiectare, care operează cu valori nominale

- s-au efectuat analize asupra unor sisteme de cea mai bună calitate – sisteme limitate de difracție
- s-a considerat oportună abordarea problemelor de la simplu la complex, astfel încât analiza a luat în considerare cel mai simplu sistem optic limitat la difracție (dubletul care conține trei dioptri) și un sistem mai complex format din șase dioptri
- studiul s-a bazat pe modelarea matematică a sistemului optic analizat și simularea erorilor de execuție și montaj
- au fost luate în considerare abaterile dimensionale de la valorile nominale ale razelor și grosimilor și erorile de descentrare și înclinare în raport cu axa y
- întregul demers de cercetare a utilizat un soft specializat, dedicat calculului optic – OSLO LT produs de firma Sinclair Optics
- analiza a urmărit influența individuală a fiecărui parametru geometric și de poziție a dioptrilor sistemelor, iar pentru evaluarea influenței abaterilor s-au utilizat trei parametri: puterea optică, RMS OPD și raportul Strehl, considerând că cele trei elemente oferă o caracterizare completă și sintetică a performanțelor unui sistem optic
- etapa următoare a vizat studiul influenței cumulate a erorilor de execuție și poziție și stabilirea nivelului admis al acestora pentru calitatea sistemelor de complexitate diferită

În sinteză, rezultatele modelării și simulării efectuate sunt următoarele:

- abaterea de la valorile nominale ale razelor și grosimilor (dar în mult mai mică măsură) afectează mai ales puterea sistemelor optice. Calitatea imaginii suferă numai în sensul că abaterea de la distanța focală de referință ideală implică o deplasare axială a planului de referință real. Eroarea poate fi compensată pe standul de verificare finală a calității sistemului prin defocusare corespunzătoare
- recomandările privind toleranțele admise pentru raze vizează un domeniu de $(\pm 0.5 \dots \pm 1)\%$ din valoarea nominală pentru orice sistem optic. Prescrierea toleranțelor admise la dimensiunile razelor se face prin indicarea numărului de inele de interferență vizibile prin aspectare în lumină albă. Numărul acestora, la aceeași abatere procentuală a razei, depinde de valoarea nominală a razei și gabaritul radial al lentilei, ceea ce implică un calcul exact al acestui număr pentru fiecare dioptru, în mod particular. Recomandările din literatură pot avea un caracter pur orientativ; în unele cazuri se pot dovedi inutile restrictive și în alte cazuri – incorecte prin permisivitate excesivă
- grosimea lentilelor afectează în mică măsură puterea sistemelor optice și cu un grad foarte scăzut calitatea imaginii, astfel încât sunt admise toleranțe mari (de până la $\pm 10\%$ sau, în unități de lungime, de ordinul $(\pm 0.1 \dots \pm 0.2)\text{mm}$)

- calitatea imaginii este afectată de descentrarea dioptrilor cu o intensitate medie, dar este drastic diminuată de înclinarea dioptrilor
- descentrarea sistemelor optice provine mai ales datorită jocului dintre montură și piesele optice
- descentrările recomandate, indiferent de numărul dioptrilor, sunt de ordinul (0.01...0.02)mm. Valorile mai scăzute recomandate de literatură sunt nerealiste din punct de vedere al posibilităților practice de realizare
- înclinarea dioptrilor poate fi controlată și corectată numai pe standuri optice, care realizează alinierea sistemelor și, din punct de vedere mecanic, asigură suprapunerea axelor geometrică și optică prin debordare
- debordarea este o operație mecanică asimilabilă cel mult unei strunjiri de finisare, astfel încât la ajustajul prevăzut pentru fixarea în montură trebuie avut în vedere că piesa care poate fi mai precis prelucrată este cea mecanică, metalică, finisabilă prin rectificare
- prescrierea ajustajului depinde de gabaritul componentelor optice, care impun abateri superioare și inferioare în conformitate cu sistemul standardizat de toleranțe și ajustaje
- cele mai mici descentrări reziduale, datorate montajului cu joc, rezultă pentru ajustaje de tipul H6/e7 sau H6/f6, dar precizia de execuție pe care o presupune realizarea lor depinde de tehnologia disponibilă
- înclinările admise variază între 10" și 1° și, cu necesitate, trebuie distribuite conform cerințelor fiecărui sistem, pe dioptri, a căror importanță relativă, din acest punct de vedere nu urmărește o regulă ușor de formulat
- concluzia generală conduce la necesitatea studiului prin simulare a fiecărei aplicații particulare, ca mod unic de stabilire rațională a abaterilor admise pentru fiecare dioptru, din toate punctele de vedere. Urmărirea recomandărilor generale poate conduce la restricții excesive, inutile și costisitoare sau la permisivitate care se reflectă direct în scăderea calității imaginii.

Având în vedere concluziile care au rezultat în urma simulărilor și anume aceea că cele mai influente erori asupra calității imaginii sunt cele de montaj și în special înclinarea componentelor în raport cu axa optică, pentru determinările experimentale, s-a proiectat un stand destinat încercărilor care să pună în evidență acest aspect.

Pentru analiză s-a utilizat o lentilă convergentă executată din policarbonat ($n=1.60$), de formă echiconvexă și deschidere $\Phi 40$.

Măsurările s-au efectuat în lumină albă și monocromatică (pentru linia verde cu $\lambda=546.074\text{nm}$ și respectiv roșie cu $\lambda=643.850\text{nm}$).

Lentila, aliniată optic cu dispozitivul de iluminare și diafragma cu fante orizontale, a

fost așezată inițial în poziția corectă, cu planele principale perpendiculare pe axa optică. În această poziție s-au determinat caracteristicile sale de referință ($f'=100\text{mm}$, $s'_F=97\text{mm}$), care au constituit pentru toate măsurările ulterioare repere pentru planul imagine de referință.

În absența înclinării față de axa optică, lentila a fost considerată lipsită de aberații, astfel încât toate aberațiile măsurate sau calculate indirect pot fi admise ca datorate exclusiv înclinării.

Lentila a fost înclinată față de axa optică de referință cu ajutorul unui disc Hartle, care permite atât măsurarea unghiurilor cât și a distanțelor pe direcția axelor z și y .

Pentru evidențierea clară a efectelor, domeniul variabilei unghiulare a fost mai larg decât plaja erorilor uzuale de așezare a unei componente singulare. S-au simulat erori de înclinare a lentilei de până la 10° . Totuși, încercările pot acoperi cazurile sistemelor formate dintr-un șir mai lung de subansambluri optice.

Măsurările directe sau indirecte au permis determinarea numerică a tuturor aberațiilor geometrice axiale, transversale și sagitale:

- aberația sferică longitudinală și transversală
- coma tangențială și sagitală
- curbura de câmp astigmatice tangențială și sagitală
- curbura de câmp (raza sferei Petzval)
- distorsiunea.

Rezultatele obținute prin prelucrarea unor imagini digitale preluate din spațiul imagine, în care au fost vizualizate razele marginale, mediane și raza pupilară principală, au pus în evidență influențe puternice, de tip liniar sau parabolic, al înclinării lentilei asupra tuturor aberațiilor geometrice.

Cele mai importante și rapide creșteri sunt înregistrate, desigur, de aberațiile specifice fasciculelor înclinate, la care raza pupilară principală nu coincide cu axa optică: coma, curbura astigmatice de câmp și distorsiunea.

Determinările experimentale validează concluziile rezultate prin modelarea sistemelor optice și simularea erorilor de montaj.

Descrierea, în rezumat, a realizărilor din lucrare conduce la concluzia că obiectivele tezei au fost atinse, iar problemele puse au primit soluții determinate prin modelări matematice și simulări, de asemenea, prin încercări experimentale. În mod concret, teza s-a finalizat cu importante observații și recomandări cu caracter practic.

Cele mai importante contribuții originale ale autoarei sunt formulate, în sinteză, după cum urmează:

- sinteza unui material bibliografic extins, care cuprinde atât titluri clasice, cât și cele mai noi apariții pe plan autohton și internațional, cu privire la erorile de execuție și

montaj ale pieselor optice

- sistematizarea și ilustrarea adecvată a posibilelor erori de prelucrare și montaj, cu precizarea influenței negative asupra calității imaginii
- sinteza informației dintr-un material extrem de vast, eterogen ca mod de abordare, de largă acoperire privind școlile europene și americane de inginerie optică, având în vedere metodele moderne de apreciere a calității sistemelor optice
- proiectarea unui amplu și cuprinzător studiu al influenței erorilor de execuție și montaj prin modelare și simulare matematică, utilizând un puternic instrument de lucru oferit de programul specializat OSLO LT
- desfășurarea analizei pe sisteme optice limitate la difracție; sistemul cel mai simplu care poate îndeplini această condiție este dubletul acromat. Astfel studiul a vizat un astfel de dublet și a fost completat cu analiza unui sistem mai complex format din șase dioptri, pentru a pune în evidență importanța numărului de dioptri care alcătuiesc sistemul
- studiul influenței individuale și a efectelor cumulate ale tuturor erorilor de execuție și montaj posibile: abateri dimensionale ale razelor și grosimilor, descentrarea și înclinarea dioptrilor și componentelor singulare sau a subansamblurilor lipite
- stabilirea efectului fiecărui parametru declarat ca variabilă în procesul de fabricație asupra caracteristicilor sistemului optic: astfel, a rezultat că erorile de execuție afectează cu precădere puterea sistemului, cu implicații indirecte asupra calității imaginii prin defocusarea consecutivă modificării focalei; a rezultat, de asemenea, că erorile de montaj diminuează puternic și cu un gradient ridicat de creștere a influenței toți parametrii de calitate a imaginii
- recomandarea unor valori practice sau a metodei exacte care să particularizeze abaterile maxime admise pentru erorile de execuție; cea mai importantă observație vizează dependența complexă a numărului de inele de interferență de valoarea nominală a razei, abaterea efectivă exprimată în unități de lungime și gabaritul radial al lentilei
- recomandarea valorilor necesare teoretic a fi impuse erorilor de montaj și discutarea posibilităților realiste de prescriere a unor ajustaje, care să poată fi realizate practic prin tehnologiile specifice prelucrării suprafeței exterioare a componentelor optice și a alezajelor conjugate ale monturii
- sublinierea observației generale că numărul de dioptri impune o restrângere a abaterilor admise pentru toate tipurile de erori
- exprimarea concluziei generale că cel mai indicat mod de a prescrie corect toleranțele pentru ansamblurile optomecanice este acela de a efectua simulări pentru fiecare aplicație concretă, nefiind posibilă deducerea analitică a unei relații de

compunere a efectelor, atât datorită numărului ridicat de variabile, cât și a sensului de influență a acestora, care de la caz la caz poate fi mai mult sau mai puțin intens sau chiar de sens contrar.

- proiectarea unui experiment care să permită evidențierea tuturor aberațiilor geometrice ale sistemelor optice
- proiectarea și realizarea standului experimental
- efectuarea unui număr mare de măsurări cu preluarea unor imagini ale tuturor cazurilor analizate
- prelucrarea imaginilor digitale și interpretarea parametrilor de calitate a imaginii rezultați direct sau prin calcul.

BIBLIOGRAFIE

- [B1] Bodea R., Gruescu, C., **Străuți-Negru G.** *Resolution, Contrast and Image Quality of Endoscopes Using Optical Fibers, Part I*, Annals of the Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering, CD-ROM Edition, Vol. III (XIII), 2004, ISSN 1583-0691
- [B2] Bodea R., Gruescu, C., **Străuți-Negru G.** *Resolution, Contrast and Image Quality of Endoscopes Using Optical Fibers, Part II*, Annals of the Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering, CD-ROM Edition, Vol. III (XIII), 2004, ISSN 1583-0691
- [B3] Boreman, G.D., *Transfer Function Techniques*, in Handbook of Optics, vol.II, ch. 32, McGraw Hill Inc., NY, 1995
- [B4] Băcescu, D., *Construcția și perfecționarea obiectivelor sistemelor optice de măsurare*, Teza de doctorat, UP București, 1996
- [C1] Calciu, M., ș.a., *Utilajul și tehnologia confecționării lentilelor și prismelor*, E.D.P., București, 1973
- [C2] Crețu, E., Tomiuc, L., *Optică tehnică*, Tipografia Academiei de Înalte Studii Militare, București, 1993
- [C3] Crețu, E., ș.a., *Aplicații în calculul și proiectarea sistemelor optice*, Ed. Academiei Tehnice Militare, București, 1995
- [C4] Crețu, E., Câmpeanu, M., *Tehnici de laborator în optica tehnică și construcția aparatului artileristice*, Tipografia Academiei de Înalte Studii Militare, București, 1994
- [C5] Curatu, E., *Calitatea sistemelor optice. Funcția optică de transfer*, Ed. Academiei Române, București, 1992
- [D1] Davidescu A., Gruescu C., *Diagrama spot – criteriu de calitate a imaginii*, A XXVIII-a Sesiune de Comunicări Științifice cu participare internațională, Academia Tehnică Militară, București, 1999
- [D2] Dodoc, P., *Calculul și construcția aparatelor optice*, E.D.P., București, 1983
- [D3] Duma, V.F., *Contribuții la analiza și sinteza sistemelor de scanare*, Teza de doctorat, UP Ymișoara, 2001
- [D3] Duma, V.F., Nicoară, I., *Some Optical Characteristics of Centered Optical Systems*, Buletinul Științific al UPT, Tom 39(53), 1994
- [G1] Goodman, D.S., *General Principles of Geometric Optics*, in Handbook of Optics, vol.II, ch. 1, McGraw Hill Inc., NY, 1995
- [G2] Gruescu, C., *Elemente de optică tehnică și aparate optice*, Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 2000

- [G3] Gruescu, C., Nicoară, I., *The cemented achromat – a critical view*, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Tom 45(59), seria Mecanică, 1999
- [G4] Gruescu, C., **Strauți Negru, G.**, Nicoara I. *Aspects concerning the influence of execution errors of optical components upon the image quality*, The VIth international Conference on Precision Mechanics and Mechatronics COMEFIM-6, Brasov, 2002, volume 1-20a, p 281-284
- [G5] Gruescu, C., *Analiza aberației sferice și a comei sagitale pentru lentile singulare*, Analele Universității Aurel Vlaicu Arad, 2000, Mecanică, p.252-255
- [G6] Gruescu C., **Balaban, G.**, *Analyse of transverse spherical aberration of a tilted lens*. The 8.th Symposium on Mechanisms and Mechanical Transmissions with international participation, Timișoara, 2000, p.143-148
- [G7] Gruescu, C., Nicoară, I., *Study on image quality in respect with the lens position errors*. Sesiunea de Comunicări cu participare internațională, Agenția de Cercetare pentru Tehnologii Militare, București, 2001
- [G8] Gruescu, C., Nicoară, I., *Considerations on eyeglasses image quality*, Proceedings of the VIIth Symposium. Academia Română Filiala Timișoara Ed. Politehnica 2003, p.209-216, ISBN 973-625-065-2
- [G9] Gruescu, C., Bodea, R., Nicoară, I., *Image Quality Optimization of an Achromatic Doublet Using Defocusing and Methods Based on OPD*. Romanian Journal of Opto-electronics, Romanian Society of Optoelectronics, vol. XII, nr.4/2003, ISSN 1453-0600
- [G10] Gruescu, C., Bodea, R., Nicoară, I., *Glass Choise for Achromatic Optical Systems*, Romanian Journal of Opto-electronics, Romanian Society of Optoelectronics, vol. XII, nr.4/2003, ISSN 1453-0600
- [G11] Gruescu, C., Bodea, R., Nicoară, I., *Image Quality Optimization of an Achromatic Triplet Using Defocusing and Methods Based on OPD*, Proceedings of COMEFIM '7, The 7-th International Conference on Mechatronics and Precision Engineering. Bucharest, 2004, p.263
- [G12] Gruescu C., **Negru-Strauți-G.**, Bodea R., *Application of Electra Method on Optical Products Chioce*, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara România, Tom 48 (62) 2003, Fascicola 1,2 Management. Economic Engineering. Transportation Engineering
- [G13] Gruescu, C., Pommersheim, A., *Optică tehnică*, Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 1999
- [G14] Gruescu, C., Zsivanov, D., *Aparate spectrale și fotometrice*, Lito, UPT, 1997

- [G15] Gruescu., C.
Nicoară, I. *Aparate optice. Analiza și sinteza sistemelor optice lenticulare.* Ed. Politehnica Timișoara 2004, ISBN 973-625-158-6
- [H1] Halvorson, M., Gygmyr, D.,
[H2] Hecht, E., *Optics* 3rd ed., Eddison Wesley Longman, Inc., NY, 1998
- [H3] Hütte *Manualul inginerului, Fundamente, E.T., București, 1995*
- [H4] Homei, D., *Contribuții la optimizarea unor parametri specifici aparaturii artileristice, opto-mecanice și optoelectronice, Teza de doctorat, ATM București, 2003*
- [H4] Hodam, F., *Technische Optik, VEB Verlag Technik, Berlin, 1965*
- [J1] Johnson, B.R., *Lenses, in Handbook of Optics. vol.II, ch.1, McGraw Hill Inc., NY,1995*
- [J2] Jones, R.V., *Instruments and Experiences. John Wiley, New York, 1988*
- [K1] Kingslake, R., *Lens design fundamentals, Academic Press, N.Y.,1978*
- [L1] Luca, E., ș.a., *Fizica generală, E.D.P., București, 1981*
- [L2] Lytle, J.D., *Polymeric Optics, in Handbook of Optics, vol.II, ch. 33, McGraw Hill Inc., NY,1995*
- [M1] Malacara, D., Malacara, Z., *Optical Metrology, in Handbook of Optics, vol.II, ch. 29, McGraw Hill Inc., NY,1995*
- [M2] Mihalca, I., *Optică, partea I, Lito IPT, 1981*
- [M3] Mîrzu, M., Crețu, E., Nicoară, I., *Optica ondulatorie și Fourier, ED. Academiei Tehnice Militare și ED. Pro Transilvania, București, 1996*
- [M4] Moisil, G., Curatu, E., *Optică, Teorie și aplicații, E.T., București, 1986*
- [M5] Marian, A.M., *Contribuții privind parametrizarea fenomenului cromatic, Teza de doctorat, UP Timișoara, 2002*
- [M6] Mazăre, P., *Contribuții la studiul reflectorilor cu diagrama de directivitate $\cos^2(\theta)$, Teza de doctorat, ATM București, 2004*
- [N1] Naumann, A., Schroder, G., *Bauelemente der Optik. Taschenbuch der technischen Optik, Carl Hanser Verlag München Wien, 1992*
- [N2] Nicoară, I., *Calculul și construcția aparatelor optice, vol.I, II, Lito I.P.T., 1987*
- [N3] Nicoară, I., ș.a., *Calculul și construcția aparatelor optice, Îndrumător de proiectare, Lito IPTVT, 1984*
- [N4] Nicoară, I., ș.a., *Aparate optice, Tehnici de laborator, Ed. Mirton, Timișoara, 1996*

- [N5] Nicoară, I., Gruescu, C., și Aparat optice, vol I, Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 2000
- [N6] Nicoară, I., și a., Considerations on Eyeglasses Image Quality. Proceedings of the VIIIth Symposium. Academia Română Filiala Timișoara Ed. Politehnica 2003, p.209-216, ISBN 973-625-065-2
- [N7] Nossiter, J., Microsoft Excel 97, Ed. Teora, București, 1998
- [O1] O'Shea, D.C., Elements of Modern Optical Design, John Wiley & Sons, New York, 1985
- [O2] O'Shea, D.C., Harrigan, E., Aberration Curves in Lens Design. in Handbook of Optics, vol. I, ch. 33, McGraw Hill Inc., NY, 1995
- [P1] Pommersheim, A., Optica tehnică, curs pentru subingineri. vol. I, Lito I.P.T., 1989
- [P2] Pommersheim, A. și a., Optica tehnică, Lucrări de laborator, Lito UTT, 1995
- [P3] Pommersheim, A., Gruescu, C., Metoda pentru calculul unui dublet acromatic corectat la aberația de sfericitate. Analele Universității din Oradea, 1992
- [P4] Pommersheim, A., Gruescu, C., Metoda de proiectare a unui triplet apalanat, Analele Universității din Oradea, 1994
- [P5] Popescu, I.I., Toader, I., Optica, E.S.T., București, 1989
- [P6] Popescu, I.M., Teoria electromagnetică macroscopică a luminii, Ed. Științifică și Enciclopedică, București, 1986
- [P7] Popovici, V., Nicoară, I., Sisteme optice laser, Ed. Mirton, Timișoara, 1998
- [P8] Plummer, W.T., Precision: How To Achieve A Little More Of It, Even After Assembly, Polaroid Corporation, 38 Henry Street, Cambridge, MA 02139 USA
- [P9] Plummer, W.T., Fast Automatic Lens Testing of Extended-Field Image Quality, Appl. Optics 15(3), 805-810 (1976)
- [R1] Reimelt, C., și a., Program for the Automated Design of Aphocal Optical Systems, The VIth international Conference on Precision Mechanics and Mechatronics COMEFIM-6, Brasov 2002, vol. 3-21a, p 195-202
- [R2] Reimelt, C., Aplicarea tehnicilor de proiectare orientate pe obiecte în construcția aparatelor și echipamentelor, Teza de doctorat, UP Timișoara, 2003
- [R3] Rojișteanu, C., Contribuții la studiul parametrilor de sistem optimi ai telemetrelor laser, Teza de doctorat, ATM București, 2003
- [S1] Schröder, G., Technische Optik. Grundlagen und Anwendungen. Vogel Buchverlag Würzburg. 1990

- [S2] Shannon, R.R., *Optical Specification*, in Handbook of Optics, vol.I, ch.34, McGraw Hill Inc., NY,1995
- [S3] Shannon, R.R., *Tolerancing Techniques*, in Handbook of Optics, vol.I, ch.36, McGraw Hill Inc., NY,1995
- [S4] Sinclaire, D.C., *Optical Design Software*, in Handbook of Optics, vol.I, ch. 34, McGraw Hill Inc., NY,1995
- [S5] **Străuți-Negru, G.**, Gruescu, C., *Application of Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) on Optical Products Domain*, Al VII-lea Simpozion International de Management SIM 2003 "Managementul Organizatiilor Performante la începutul Mileniului 3", Timisoara – Romania 12-13 decembrie, 2003, suport CD-ROM
- [S6] Smith, W.J., *Modern Optical Engineering*, 3rd ed., McGraw Hill, NY, 2000
- [S7] Smith, W.J., *Techniques of First-Order Layout*, in Handbook of Optics, vol.I, ch. 32, McGraw Hill Inc., NY,1995
- [S8] Sterian, P., Stan., M., *Fizica*, E.D.P., București, 1985
- [S9] Subbarao, M.M *The Optical Transfer Function of Diffraction-limited System for Polychromatic Illumination*, State University. NY
- [S10] STAS 3003-79 *Optica geometrică. Terminologie și simboluri*
- [S11] STAS 4702-88 *Desene tehnice. Desene de execuție pentru piese optice*
- [S12] SR ISO 9334 - 95 *Optică și instrumente optice. Funcția de transfer optic. Definiții și relații matematice*
- [S13] SR ISO 9335 - 95 *Optică și instrumente optice. Funcția de transfer optic. Principii și proceduri de măsurare*
- [S14] Strong, J., *Procedures in Applied Optics* pp. 63-69, Marcel Dekker, New York, 1989
- [S15] Sinclair, D.C., *Whither Optical Design?*, Optics and Photonics News, June 2000
- [T1] Toader,E., Spulber,V., *Optică pentru tehnicieni*, E.T., București, 1985
- [T2] Tropf, W.J., ș.a., *Properties of Crystals and Glasses*, in Handbook of Optics, vol.II, ch. 33, McGraw Hill Inc., NY,1995
- [T3] Trufașu, A.O., *Cercetarea și realizarea unor noi utilaje optice pentru mașini-unelte de înaltă precizie*, Teza de doctorat UP București, 1997
- [T4] Tufiș, M., *Contribuții la studiul transmisiei imaginilor prin fibre optice*, Teza de doctorat, ATM București, 2004-08-02
- [Z1] Zsivanov, D., ș.a., *Analiza asistată de calculator a sferocromatismului sistemelor optice*, Analele Universității Oradea, 1995, Fascicola Mecanică, p.7-14

- [V1] Vedinaş, I., *Contribuții la studiul stabilității imaginii prin sisteme optice, Teza de doctorat, ATM București, 2002*
- [W1] www.optikos.com *How to Measure MTF and other Properties of Lenses*
- [W2] www.alma.com *Alignment Tolerances for ALMA Optics, ALMA Memo 395 by B. Lazareff*
- [W3] www.edmundoptics.com *Lenses, prisms*
- [W4] www.homeschooloffish.com *Lenses*
- [W5] www.OptiCentric.com *Tools for Production and Lab*
- [W6] www.osscc.org/bios/fellows-wjsmith.htm
- [W7] www.micro.magnet.fsu.edu/optics/timeline/index.html
- [W8] www.microscopyu.com/articles/formulas/formulasindex.html
- [W9] www.micro.magnet.fsu.edu/optics/timeline/people/index.html
- [W10] www.sff.net/people/Jeff.Hecht/history.html
- [W11] www.ee.umd.edu/~taylor/optics.htm
- [W12] www.occfiber.com/
- [W13] www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Abbe.html
- [W14] www.OSLO.com
- [W15] www.Interoptik.ro
- [W16] www.sinopt.com
- [W18] jsfejes@swva.net
- [W19] www.atmsite.org/keyword.html
- [W20] www.wtptoptics.com/Assembly.html
- [W21] www.astrosurf.com/buil/us/stage/calcul/design_us.htm
- [W22] www.sinopt.com/learning1/optsoft/whither/whither.htm