

## Uporedna analiza optimizovanih dublea pomoću metode prigušenih najmanjih kvadrata, genetskog algoritma i evolucionih strategija

Dr Darko Vasiljević, dipl.inž.<sup>1)</sup>

Duble je veoma jednostavan optički sistem sa samo dva sočiva. Date su njegove karakteristike i za izabrani rastavljeni duble izvršene su optimizacije pomoću klasične metode prigušenih najmanjih kvadrata i modernih metoda adaptivnog stacionarnog genetskog algoritma i evolucionih strategija dvočlanih EVOL i višočlanih GRUP, REKO i KORR. Analizirane su primarne monohromatske aberacije za svaki optimizovani duble ponaosob i upoređene su njihove vrednosti sa aberacijama polaznog optičkog sistema.

*Ključne reči:* Metoda prigušenih najmanjih kvadrata, genetski algoritam, evolucione strategije, projektovanje optičkih sistema, optimizacija optičkih sistema, aberacije optičkih sistema.

### Uvod

DUBLE je jedan od najjednostavnijih i veoma značajnih optičkih sistema koji se mnogo koriste u optici. Sastoji se od samo dva sočiva koja mogu biti spleljena ili rastavljena. Njegova česta i velika primena u različitim oblastima optike dovela je do velikog broja istraživanja kako što bolje i efikasnije projektovati duble koji će zadovoljiti sve postavljene zahteve. Do pojave računara projektovanje dublea bilo je zasnovano na iskustvu i talentu projektanta, sa jedne strane, i analitičkim formulama koje su razvijene na osnovu jednostavnosti konstrukcije dublea, s druge strane. Pojavom računara pristupilo se njegovom projektovanju i optimizaciji pomoću računara. Na početku su se koristile poznate matematičke metode optimizacije koje su davale dobre rezultate, ali su još uvek zahtevale od projektanta optičkih sistema veliko iskustvo i predznanje o samom optičkom sistemu koji se optimizuje. Vremenom su razvijene i neke savremene metode koje nisu bile zasnovane samo na matematičkim teorijama, već uglavnom na analogiji sa prirodnim pojavama. U tehnici je čest slučaj da se uspešne metode iz jedne oblasti pokušavaju primeniti u drugoj oblasti, često potpuno različitoj. Tako tragajući za uspešnim optimizacionim metodama primećeno je da metoda organske evolucije (poznata Darwinova teorija evolucije) predstavlja optimalnu strategiju adaptacije živih bića na njihovu okolinu. Na osnovu toga je zaključeno da bi bilo korisno primeniti principe biološke evolucije na probleme optimizacije složenih tehničkih sistema, a samim tim i optičkih i optoelektronskih sistema među kojima duble ima značajnu ulogu.

Ovaj rad predstavlja rezultat istraživanja u oblasti savremenih metoda optimizacije optičkih sistema. U prvom delu rada je definisan problem optimizacije optičkih sistema i u veoma kratkim crtama opisane su metode koje su korišćene prilikom optimizacije dublea. U drugom delu rada je prikazan izabrani rastavljeni duble koji je poslužio kao polazni optički sistem za optimizaciju. U nastavku rada su prikazani svi optimizovani optički sistemi i analizirane su

njihove primarne monohromatske aberacije: podužna i poprečna sferna aberacija, koma, astigmatizam, krivina polja i distorzija. Data je i uporedna analiza primarnih monohromatskih aberacija polaznog dublea i svih optimizovanih dublea.

### Definicija problema

Optički sistemi su definisani pomoću parametara koji su povezani sa pojedinačnim prelomnim površinama. Ovi parametri se mogu podeliti u dve velike grupe:

- osnovni parametri koji se moraju definisati za svaki optički sistem;
- opciono parametri koji se definišu samo ako taj parametar postoji, na primer, ako je prelomna površina asferična mora se definisati konična konstanta ili asferični koeficijenti.

Osnovni parametri su:

- radijus krivine za svaku prelomnu površinu optičkog sistema;
- rastojanje između dve prelomne površine optičkog sistema;
- stakla od kojih su napravljene komponente optičkog sistema;
- slobodni svetlosni otvor za svaku prelomnu površinu optičkog sistema.

Da bi se optički sistem mogao potpuno definisati i analizirati, potrebno je pored osnovnih parametara definisati i podatke za šemu zraka koja opisuje sve zrake čiji će se hod proračunavati kroz optički sistem. Na osnovu proračuna hoda zraka dobijaju se sve ostale veličine (aberracije, spot dijagram, MTF, ...) na osnovu kojih se procenjuje kvalitet optičkog sistema.

Koncept optimizacije je jednostavan, ali njegova implementacija može biti veoma komplikovana. Optimizacija se u principu može definisati na sledeći način: za zadati polazni sistem i skup željenih performansi tog sistema odrediti

<sup>1)</sup> Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

skup sistemskih promenljivih koji minimizuje odstupanje stvarnih performansi od željenih performansi sistema bez povrede bilo kojeg graničnog uslova. Ovaj, na jednostavan način definisan problem, postaje veoma složen kada je broj sistemskih promenljivih i željenih vrednosti performansi sistema velik, kada su greške nelinearne funkcije varijabli i kada greške nisu ortogonalne jedna na drugu u odnosu na promenljive. U tipičnom slučaju optimizacije optičkog sistema svi ovi uslovi su u određenoj meri istiniti.

Kada se radi sa različitim tipovima optimizacionih metoda, obično se definiše jedan broj, koji se naziva funkcija za ocenu, da karakteriše poklapanje performansi trenutnog sistema sa željenim performansama sistema. Drugim rečima, funkcija za ocenu je mera efikasnosti optimizacione metode jer je cilj optimizacije da smanji vrednost funkcije za ocenu.

Izbor odgovarajuće funkcije za ocenu je od suštinskog značaja za uspešan završetak procesa optimizacije. Sa matematičke tačke gledišta, najviše odgovara da se funkcija za ocenu predstavi u kvadratnoj formi. Taj tip funkcije za ocenu je korišćen i u svim optimizacionim metodama koje su korišćene ovom prilikom (metoda prigušenih najmanjih kvadrata, adaptivni stacionarni genetski algoritam, evolucione strategije EVOL, GRUP, REKO i KORR). Po toj metodi funkcija za ocenu se može definisati kao zbir kvadrata aberacija:

$$\psi = \sum_{i=1}^m (\omega_i \cdot f_i)^2$$

gde su:

- $\psi$  – vrednost funkcije za ocenu;
- $m$  – broj promenljivih parametara optimizacije;
- $\omega_i$  – težinski faktor za svaku aberaciju posebno;
- $f_i$  – aberacije optičkog sistema.

Težinski faktor za svaku proračunatu aberaciju je neophodan, jer se proračunavaju različiti tipovi aberacija (poprečne, ugaone i talasne) koje mogu da se veoma razlikuju. Da bi optimizaciona metoda mogla da poredi aberacije i smanjuje njihove vrednosti, potrebno ih je dovesti na uopredive vrednosti.

### Metode optimizacije

Problem automatskog projektovanja optičkih sistema i njihove optimizacije spada u klasu nelinearnih optimizacionih problema. Mnogi naučnici su istraživali i predlagali različite metode kojima su pokušavali da reše taj problem, odnosno da poboljšaju već postojeća rešenja. Sve postojeće metode se mogu podeliti u dve velike grupe:

- metode klasične optimizacije;
- savremene optimizacione metode.

Klasične optimizacione metode zasnovane su na poznatim matematičkim teorijama pronalaženja lokalnog optimuma. U optimizaciji optičkih sistema najčešće se koristila neka od varijanti metode najmanjih kvadrata. One su veoma efikasne i davale su dobre rezultate, ali su zahtevale pažljiv izbor polazne tačke optimizacije, odnosno inicijalnog optičkog sistema. Zavisno od toga koliko je projektant optičkog sistema bio u mogućnosti da pronađe dobar polazni optički sistem, postignuta je i efikasnost i uspešnost samog procesa optimizacije. To je zahtevalo od projektanta iskustvo i veliko predznanje o optičkom sistemu koji se optimizuje.

Savremene optimizacione metode su zasnovane na analogijama u prirodi. Tako su naučnici, tragajući za uspešnim metodama optimizacije tehničkih sistema, došli na ideju da

pokušaju sa metodom organske evolucije (poznata Darwinova teorija evolucije) koja predstavlja optimalnu strategiju adaptacije živih bića na njihovu okolinu. Razvijeno je nekoliko metoda koje predstavljaju pokušaje pojednostavljenog modelovanja teorije evolucije. Genetski algoritmi stavljaju akcenat na proces selekcije i različite genetske operatore, dok evolucione strategije stavljaju akcenat na mutacije zasnovane na normalnoj raspodeli.

### Klasična metoda prigušenih najmanjih kvadrata

Metoda najmanjih kvadrata je modifikacija poznate Newton – Raphsonove metode koju je razvio Levenberg [1]. U optimizaciji optičkih sistema prvi su je primenili Rosen i Eldert [2], Merion [3,4], Wynne [5]. Metoda najmanjih kvadrata se najintenzivnije razvijala krajem 1950-ih i tokom 1960-ih godina. Klasična metoda najmanjih kvadrata je numerički nestabilna zbog mogućih velikih vrednosti koraka optimizacije. Zato se prišlo razvoju metode prigušenih najmanjih kvadrata kod koje se prigušenje oscilacija u vrednosti koraka optimizacije vrši pomoću sabiranja ili množenja. Sada skoro svaki program za projektovanje i optimizaciju optičkih sistema ima neku varijantu te metode. Autorova implementacija metode prigušenih najmanjih kvadrata zasnovana je na radovima istraživača sa *Imperial Collegea* u Londonu (Wynne, Wormell i Kidger [6-9]). Detaljan opis same metode je dat u autorovoj magistarskoj tezi [10] i radu [11].

Metoda prigušenih najmanjih kvadrata spada u grupu linearnih optimizacionih metoda koje eksplicitno ne uzimaju u obzir da možda postoji veliki broj lokalnih minimuma funkcije za ocenu u prostoru svih promenljivih optičkog sistema. Broj lokalnih minimuma zavisi od oblika funkcije za ocenu i broja promenljivih parametara optičkog sistema. Ova metoda obično dovodi funkciju za ocenu optičkog sistema u lokalni minimum koji je najbliži polaznom optičkom sistemu. Projektant optičkih sistema ima nekoliko mogućnosti da pronađe optički sistem koji zadovoljava sve polazne kriterijume. To su:

- Izbor odgovarajućeg polaznog optičkog sistema. Ako optički sistem ne obezbeđuje zahtevani kvalitet lika, projektant optičkih sistema može da pokuša sa drugim (obično potpuno drugačijim) optičkim sistemom.
- Izbor promenljivih konstrukcionih parametara koji se mogu optimizovati. Neadekvatan izbor promenljivih može sprečiti linearnu konvergenciju.
- Težinski faktori koji se koriste u formulisanju funkcije za ocenu. Dobar izbor veličina težinskih faktora je od suštinskog značaja u uravnotežavanju aberacija.
- Izbor faktora prigušenja (prigušenje sabiranjem ili prigušenje množenjem) ili mogućnost modifikovanja kompletne funkcije za ocenu.

Sve ove mogućnosti umnogome zavise od veštine i iskustva projektanta optičkih sistema, mada i iskusan projektant može imati teškoća u traženju zadovoljavajućeg rešenja za projekat optičkog sistema vrhunskog kvaliteta.

### Adaptivni stacionarni genetski algoritam

Genetski algoritmi (GA) su adaptivne metode koje mogu da se koriste prilikom rešavanja kompleksnih problema pretraživanja i optimizacije. Oni su zasnovani na uprošćenju simulaciji genetskih procesa u okviru bioloških organizama. Tokom mnogo generacija, prirodne populacije razvijaju se prema principima prirodne selekcije i “preživljavanja najboljih”, koje je prvi opisao Charles Darwin u svo-

joj knjizi *Poreklo vrsta*. Imitirajući taj proces, genetski algoritmi mogu da "razviju - evoluiraju" rešenja za stvarne kompleksne probleme.

Ovom prilikom korišćena metoda adaptivni stacionarni genetski algoritam (ASGA), koju je prvi opisao Davis u [12], prilagođena je optimizaciji optičkih sistema. Ona je izabrana zato što se, za razliku od drugih metoda koje uglavnom koriste nizove bitova (bit stringove), koriste realni brojevi za predstavljanje jedinki populacije. Ovo je bitno jer se sve važne informacije o optičkom sistemu nalaze u jednom rekordu koji može da predstavlja jednu jedinku u populaciji. Detaljni opis same metode se nalazi u autorovoj doktorskoj disertaciji [13] i u [14].

Populacija optičkih sistema se inicijalizuje na slučajan način. Pošto dobre polazne tačke za optimizaciju obično nisu poznate unapred, najbolji način je da se počne optimizacija sa tačkama odnosno optičkim sistemima raspoređenim na slučajan način.

U sva tri tipa optimizacija (metoda prigušenih najmanjih kvadrata, genetski algoritam, evolucione strategije) funkcija za ocenu je definisana na isti način kao zbir kvadrata aberacija. Zbog slučajno izabranih polaznih tačaka optimizacije, funkcije za ocenu optičkih sistema se obično dosta razlikuju. Da bi postojala mogućnost da se porede funkcije za ocenu, uvodi se linerana normalizacija koja vrši interpolaciju vrednosti funkcija za ocenu u zadati interval.

Izbor roditelja u populaciji se vrši pomoću simulacije ruleta koja daje veću šansu za reprodukciju optičkim sistemima koji imaju manju funkciju za ocenu, tj. manje aberacije. Za reprodukciju se koristi stacionarna tehnika bez duplikata, jer su svi članovi populacije različiti i najbolje jedinke iz svih generacija su zajedno tako da se nijedna bitna genetska informacija neće izgubiti. Kada se izaberu dva različita roditelja, na njima se izvršava samo jedan genetski operator koji se bira pomoću simulacije ruleta iz skupa sledećih operatora:

- uniformno ukrštanje,
- srednje ukrštanje,
- mutacija realnih brojeva,
- veliko puzanje realnih brojeva i
- malo puzanje realnih brojeva.

Novi potomak se takmiči sa svim članovima populacije za mesto u njoj. Ako je on bolji, tj. ima manju funkciju za ocenu i aberacije od najlošijeg člana populacije, novi potomak se prihvata i najlošiji član populacije se briše.

### *Evolucione strategije*

Evolucione strategije su algoritmi koji imitiraju principe prirodne evolucije kao što su mutacija, rekombinacija i selekcija u rešavanju problema parametarske optimizacije. One su specifično razvijene za potrebe optimizacije složenih tehničkih sistema, dok su genetski algoritmi opšte metode za pretraživanje i optimizaciju. Teoriju evolucionih strategija je opisao Schwefel [15] koji je ujedno i njihov tvorac zajedno sa Bienertom i Rechenbergom. Detaljan opis evolucionih strategija i njihova primena u optimizaciji optičkih sistema data je u autorovoj doktorskoj disertaciji [13] i radu [16].

Sve optimizacije izabranog optičkog sistema urađene su sa sledećim evolucionim strategijama:

- EVOL - osnovne evolucione strategije kod kojih postoje samo dve jedinke - roditelj i potomak koji je nastao mutacijom roditelja. Mutacije se vrše prema Gaussovom zakonu normalne raspodele. Bolja jedinka, tj. optički si-

stem sa manjom funkcijom za ocenu, a samim tim i aberacijama, prelazi u sledeću generaciju.

- GRUP - višečlane evolucione strategije razvijene polazeći od metode EVOL, kod kojih postoji  $\mu$  roditelja koji proizvode  $\lambda$  potomaka ( $\lambda > \mu$ ). Samo  $\mu$  najboljih jedinki prelazi u sledeću generaciju. Potomci u metodi GRUP kao i u metodi EVOL nastaju mutacijom po Gaussovom zakonu normalne raspodele.
- REKO - višečlane evolucione strategije koje su u svemu identične sa metodom GRUP, samo što omogućavaju da potomci mogu nastati na dva načina: mutacijom kao i u metodi GRUP i rekombinacijom dve slučajno izabrane jedinke u novu jedinku.
- KORR - najsloženije višečlane evolucione strategije koje imaju dve mogućnosti za izbor roditelja za sledeću generaciju, pet genetskih operatora koje mogu primeniti na promenljivim konstrukcionim parametrima optičkog sistema, koracima optimizacije i uglovima rotacije mutacionog hiperelipsoida.

### **Duble**

Duble je najjednostavniji optički sistem koji se sastoji iz dva sočiva - sabirnog i rasipnog - napravljenih od različitih tipova stakla. Sabirno sočivo se obično pravi od „crown” stakla koje ima mali indeks prelamanja i veliki Abbeov broj, dok se rasipno sočivo pravi od „flint” stakla koje ima veliki indeks prelamanja i mali Abbeov broj. Sočiva mogu biti slepljena ili rastavljena na malom rastojanju. Najčešći tip konstrukcije dublea je da sabirno sočivo bude prvo i pri tome da je prelomna površina sa većim radijusom okrenuta ka predmetu, a prelomna površina sa manjim radijusom okrenuta ka rasipnom sočivu koje ima isti raspored prelomnih površina, tj. prelomna površina sa većim radijusom je okrenuta ka liku.

Kod slepljenog dublea, zbog jednostavnosti konstrukcije, postoji mali broj konstrukcionih parametara koji se mogu menjati da bi se postiglo smanjenje aberacija. Slepljeni duble ima sledeće parametre:

- tri radijusa od kojih se jedan uvek koristi za definisanje tačne vrednosti žižne dužine;
- dve debljine sočiva i
- dva stakla koja se, uglavnom, unapred biraju da bi se postigla ahromatizacija odnosno korekcija hromatske aberacije.

Kod dublea primarna aberacija koja se koriguje je sferna aberacija (podužna i poprečna) jer ona određuje veličinu razlaganja lika na optičkoj osi. Razlaganje u blizini optičke ose ograničeno je i veličinom odstupanja od sinusnog uslova. Zbog nedostatka dodatnih promenljivih konstrukcionih parametara, ostale primarne monohromatske aberacije (astigmatizam, krivina polja i distorzija) ostaju nekorigovane. Kod rastavljenog dublea se uvodi dodatni promenljivi konstrukcioni parametar, rastojanje između dva sočiva, koji omogućava potpunu korekciju sferne aberacije (podužne i poprečne) i kome, odnosno zadovoljenje sinusnog uslova. Ako se dozvoli određena mala vrednost sferne aberacije ili kome, moguće je donekle korigovati astigmatizam, krivinu polja i distorziju. Često se od dublea očekuju da budu difrakcijom ograničeni objektivni, odnosno da aberacije budu toliko male da i difrakcioni efekti postanu dominantna greška u formiranju lika.

Osnovne karakteristike dublea su:

- mali uglovi vidnog polja maksimalno do  $6^\circ$ , a ako se želi da duble bude dobro aberaciono korigovan i da se pona-

ša kao difrakcijom ograničeni objektiv, onda vidno polje ne sme biti veće od  $2^\circ$ . Pri uglu vidnog polja većem od  $2^\circ$  dolazi do izražaja nekorigovani astigmatizam, krivina polja i distorzija;

- dobro aksijalno razlaganje koje na osi može da ide i do 1000 lp/mm ako se koristi monohromatska laserska svetlost i relativni otvor je  $f/5$ . Standardna veličina razlaganja je do 40 lp/mm za puni ugao vidnog polja prilikom korišćenja bele svetlosti i relativnim otvorom do  $f/2$ ;
- mali relativni otvor. Ako se želi da duple bude difrakcijom ograničeni objektiv, onda relativni otvor može maksimalno da bude  $f/5$ . Maksimalni relativni otvor sa kojim duple može da radi, a da se pri tome ne zahteva da bude difrakcijom ograničen objektiv, je  $f/2$ .

Slepljeni dublei ahromati imaju široku primenu u optici jer imaju višestruko bolje karakteristike od običnih sočiva i veoma su jednostavne konstrukcije. Tipične primene su:

- objektiv za teleskopske nišane;
- objektiv za periskope i
- lupa.

Sa pojavom laserskih sistema, duple ahromati su našli veliku primenu u fokusiranju i manipulaciji laserskog zaka, odnosno u njegovom širenju ili skupljanju. Naročitu primenu su našli rastavljeni dublei, jer oni nude odlične performanse u odnosu na slepljene dublee i pojedinačna sočiva. Vazdušno rastojanje između sočiva ima ulogu trećeg sočiva i omogućava veći stepen korekcije aberacija nego što se može postići kod slepljenog dublea ahromata. Na ovaj način je moguće uskladiti aberacije za šire područje talasnih aberacija.

### Analiza aberacija dublea

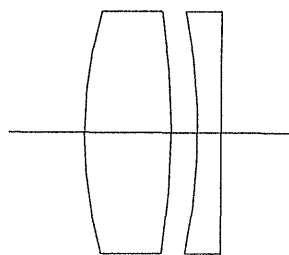
Kao primer za testiranje svih opisanih optimizacionih metoda izabran je standardni rastavljeni duple koji je preuzet iz [17] i ima oznaku *Cox design no. 102* (Cox projekat br. 102). Tu je prikazan veliki broj gotovih optičkih sistema koji su obično već patentirani. To su veoma dobri optički sistemi koje su projektanti već optimizovali da bi mogli da rešavaju određene probleme sa njima. Svi objektivni prikazani u [17] svedeni su na istu žižnu dužinu od 1". Da bi mogli da se optimizuju u programu APOS, potrebno je sve radijuse i sva rastojanja prevesti u milimetre i pronaći odgovarajuća stakla. Ovako prerađeni optički sistemi možda malo odstupaju od polaznih optičkih sistema prikazanih u [17], ali to je neophodno da bi se ovakvi objektivni uopšte mogli proračunavati i dalje optimizovati u programu APOS. Osnovni optički podaci za izabrani rastavljeni duple su prikazani u tabeli 1.

Tabela 1. Osnovni optički podaci za rastavljeni duple

- žižna dužina	$f = 25$ mm
- relativni otvor	$f/4$
- položaj aperturne dijafragme	na prvoj prelomnoj površini objektivna
- ugao vidnog polja	$\omega = 4^\circ$

Izabrani rastavljeni duple ispunjava sve preporuke: relativni otvor je manji od  $f/2$ , dok je ugao vidnog polja manji od  $6^\circ$ . Grafički prikaz objektivna dat je na sl. 1.

Rastavljeni duple je klasične konstrukcija kod koje prvo dolazi sabirno sočivo od „crown” stakla, a zatim rasipno sočivo od „flint” stakla.



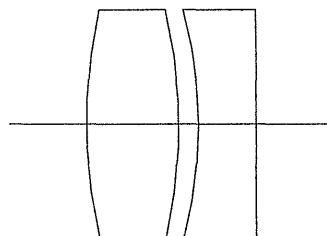
Slika 1. Rastavljeni duple polazni optički sistem

Aberacije polaznog optičkog sistema prikazane su u tabeli 2.

Tabela 2. Aberacije polaznog rastavljenog dublea

Aberacije	Linije spektra		
	d	C	F
Podužna sferna aberacija [mm]			
$H = H_{\max}$	0.04688	0.06245	0.05269
$H = 0.7 \cdot H_{\max}$	0.01023	0.02955	0.00603
Poprečna sferna aberacija [mm]			
$H = H_{\max}$	0.00593	0.00790	0.00666
$H = 0.7 \cdot H_{\max}$	0.00090	0.00260	0.0053
Astigmatizam [mm]			
$\omega = \omega_{\max}$	0.15396		
$\omega = 0.7 \cdot \omega_{\max}$	0.07578		
Krivina polja [mm]			
$\omega = \omega_{\max}$	-0.19080		
$\omega = 0.7 \cdot \omega_{\max}$	-0.09371		
Distorzija [%]			
$\omega = \omega_{\max}$	0.02547	-0.02036	0.14365
$\omega = 0.7 \cdot \omega_{\max}$	0.01244	-0.03316	0.13005
Koma [mm]			
$\omega = \omega_{\max}, H = H_{\max}$	-0.03374	-0.03448	-0.03201
$\omega = \omega_{\max}, H = 0.7 \cdot H_{\max}$	-0.01703	-0.01780	-0.01514
$\omega = 0.7 \cdot \omega_{\max}, H = H_{\max}$	-0.02384	-0.02435	-0.02264
$\omega = 0.7 \cdot \omega_{\max}, H = 0.7 \cdot H_{\max}$	-0.01204	-0.01257	-0.01072

Analizom aberacija rastavljenog dublea prikazanih u tabeli 2, vidi se da objektiv ima dobro korigovane aberacije što se i moglo očekivati jer je on već optimizovan i patentiran i kao takav preuzet iz [17]. Poprečna sferna aberacija je potpuno korigovana i iznosi od  $5 \mu\text{m}$  do  $7 \mu\text{m}$  za tri talasne dužine, odnosno *d*, *C* i *F* spektralne linije sa kojima se računa i maksimalni svetlosni otvor. Koma je takođe dobro korigovana i iznosi  $32 \mu\text{m}$  do  $34 \mu\text{m}$ . Poznato je da je najvažnija korekcija sferne aberacije i ako je moguće kome, dok se ostale aberacije ne koriguju zbog nedostatka promenljivih konstrukcionih parametara. Astigmatizam, krivina polja i distorzija su, iako nekorigovani, prihvatljivo mali.



Slika 2. Rastavljeni duple optimizovan pomoću metode prigušenih najmanjih kvadrata

Rastavljeni duple optimizovan pomoću metode prigušenih najmanjih kvadrata je prikazan na sl. 2. Prilikom optimizacije izvršena je stroga kontrola debljina sočiva da se ne bi desilo da pojedina sočiva (naročito sabirno) postanu previše debela.

Aberacije rastavljenog dublea optimizovanog pomoću metode prigušenih najmanjih kvadrata su prikazane su u tabeli 3.

Tabela 3. Aberacije rastavljenog dublea optimizovanog pomoću metode prigušenih najmanjih kvadrata

Aberacije		Linije spektra		
		d	C	F
Podužna sferna aberacija [mm]	$H=H_{max}$	0.01386	0.02323	0.03527
	$H=0.7 \cdot H_{max}$	0.00094	0.01371	0.01282
Poprečna sferna aberacija [mm]	$H=H_{max}$	0.00174	0.00292	0.00443
	$H=0.7 \cdot H_{max}$	0.00008	0.00120	0.00112
Astigmatizam [mm]	$\varpi = \varpi_{max}$	0.13489		
	$\varpi = 0.7 \cdot \varpi_{max}$	0.06633		
Krivina polja [mm]	$\varpi = \varpi_{max}$	-0.17382		
	$\varpi = 0.7 \cdot \varpi_{max}$	-0.08533		
Distorzija [%]	$\varpi = \varpi_{max}$	-0.00494	-0.02408	0.04933
	$\varpi = 0.7 \cdot \varpi_{max}$	-0.00243	-0.02142	0.05149
Koma [mm]	$\varpi = \varpi_{max}, H = H_{max}$	0.00495	0.00463	0.00222
	$\varpi = \varpi_{max}, H = 0.7 \cdot H_{max}$	0.00142	0.00110	0.00222
	$\varpi = 0.7 \varpi_{max}, H = H_{max}$	0.00314	0.00291	0.00363
	$\varpi = 0.7 \cdot \varpi_{max}, H = 0.7 \cdot H_{max}$	0.00084	0.00062	0.00139

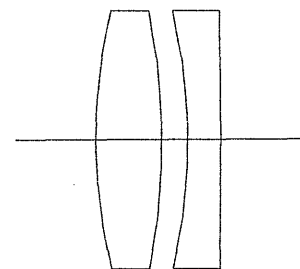
Analizom aberacija optimizovanog rastavljenog dublea prikazanih u tabeli 3, vidi se da su sferna aberacija (podužna i poprečna) kao i koma potpuno korigovani što je i bio cilj optimizacije. Poprečna sferna aberacija iznosi od 2  $\mu\text{m}$  do 4  $\mu\text{m}$ , zavisno od talasne dužine odnosno od spektralne linije sa kojom se računa i za maksimalni svetlosni otvor. Koma iznosi od 2  $\mu\text{m}$  do 5  $\mu\text{m}$  za maksimalni ugao vidnog polja i maksimalni svetlosni otvor. Interesantno je primetiti, da je distorzija dobro korigovana. Ako se uporede aberacije optimizovanog i polaznog rastavljenog dublea, vidi se da je prilikom optimizacije došlo do smanjenja svih aberacija.

Naročito su smanjene koma i distorzija, dok ostale aberacije (sferna aberacija, astigmatizam i krivina polja) nisu značajnije smanjene.

Rastavljeni duble optimizovan pomoću metode adaptivni stacionarni genetski algoritam prikazan je na sl.3. Prilikom optimizacije je izvršena stroga kontrola debljina sočiva da pojedina sočiva ne bi (naročito sabirno) postala previše debela. Kontrola debljina sočiva je izvršena pomoću koeficijenta sa kojim se množila debljina sočiva polaznog sistema da se dobije maksimalna vrednost intervala iz koga se na slučajan način određuje debljina sočiva tekućeg optičkog sistema.

Aberacije rastavljenog dublea optimizovanog pomoću metode adaptivni stacionarni genetski algoritam prikazane su u tabeli 4.

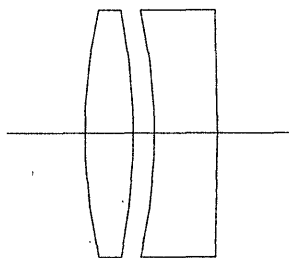
Analizom aberacija optimizovanog rastavljenog dublea prikazanih u tabeli 4, vidi se da su sferna aberacija (podužna i poprečna) kao i koma potpuno korigovani što je i bio cilj optimizacije. Poprečna sferna aberacija iznosi od 5  $\mu\text{m}$  do 8  $\mu\text{m}$ , zavisno od talasne dužine odnosno od spektralne linije sa kojom se računa i za maksimalni svetlosni otvor. Koma iznosi od 3  $\mu\text{m}$  do 5  $\mu\text{m}$  za maksimalni ugao vidnog polja i maksimalni svetlosni otvor. Ako se uporede aberacije optimizovanog i polaznog rastavljenog dublea, vidi se da je prilikom optimizacije došlo do smanjenja svih aberacija. Naročito je smanjena koma, dok ostale aberacije – sferna aberacija, astigmatizam i krivina polja i distorzija – nisu značajnije smanjene.



Slika 3. Rastavljeni duble optimizovan pomoću metode ASGA

Tabela 4. Aberacije rastavljenog dublea optimizovanog pomoću metode ASGA

Aberacije		Linije spektra		
		d	C	F
Podužna sferna aberacija [mm]	$H=H_{max}$	0.04126	0.04965	0.06668
	$H=0.7 \cdot H_{max}$	0.01315	0.02490	0.02910
Poprečna sferna aberacija [mm]	$H=H_{max}$	0.00519	0.00625	0.00830
	$H=0.7 \cdot H_{max}$	0.00115	0.00219	0.00255
Astigmatizam [mm]	$\varpi = \varpi_{max}$	0.14817		
	$\varpi = 0.7 \cdot \varpi_{max}$	0.07288		
Krivina polja [mm]	$\varpi = \varpi_{max}$	-0.18622		
	$\varpi = 0.7 \cdot \varpi_{max}$	-0.09143		
Distorzija [%]	$\varpi = \varpi_{max}$	0.01394	-0.01833	0.09790
	$\varpi = 0.7 \cdot \varpi_{max}$	0.00681	-0.02529	0.09034
Koma [mm]	$\varpi = \varpi_{max}, H = H_{max}$	-0.00485	-0.00543	-0.00357
	$\varpi = \varpi_{max}, H = 0.7 \cdot H_{max}$	-0.00367	-0.00422	-0.00235
	$\varpi = 0.7 \cdot \varpi_{max}, H = H_{max}$	-0.00375	-0.00414	-0.00286
	$\varpi = 0.7 \cdot \varpi_{max}, H = 0.7 \cdot H_{max}$	-0.00273	-0.00311	-0.00181



Slika 4. Rastavljeni duble optimizovan pomoću evolucionih strategija metoda EVOL

Rastavljeni duble optimizovan pomoću evolucionih strategija metoda EVOL prikazan je na sl.4. Prilikom optimizacije izvršena je stroga kontrola debljina sočiva da pojedina sočiva (naročito sabirno) ne postanu previše debela. Način kontrole debljine sočiva kod evolucionih strategija je identičan kao kod adaptivnog stacionarnog genetskog algoritma.

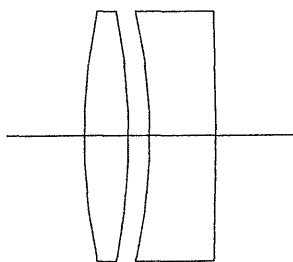
Aberacije rastavljenog dublea optimizovanog pomoću evolucionih strategija metoda EVOL prikazane su u tabeli 5.

Tabela 5. Aberacije rastavljenog dublea optimizovanog pomoću evolucionih strategija metoda EVOL

Aberacije		Linije spektra		
		d	C	F
Podužna sferna aberacija [mm]	$H=H_{max}$	0.04427	0.05343	0.06666
	$H=0.7 \cdot H_{max}$	0.01366	0.02645	0.02600
Poprečna sferna aberacija [mm]	$H=H_{max}$	0.00557	0.00672	0.00838
	$H=0.7 \cdot H_{max}$	0.00120	0.00232	0.00228
Astigmatizam [mm]	$\varpi = \varpi_{max}$	0.13845		
	$\varpi = 0.7 \cdot \varpi_{max}$	0.06808		
Krivina polja [mm]	$\varpi = \varpi_{max}$	-0.17726		
	$\varpi = 0.7 \cdot \varpi_{max}$	-0.08702		
Distorzija [%]	$\varpi = \varpi_{max}$	0.00261	-0.00852	0.03392
	$\varpi = 0.7 \cdot \varpi_{max}$	0.00127	-0.00975	0.03229
Koma [mm]	$\varpi = \varpi_{max}, H = H_{max}$	-0.00194	-0.00207	-0.00174
	$\varpi = \varpi_{max}, H = 0.7 \cdot H_{max}$	-0.00143	-0.00158	-0.00109
	$\varpi = 0.7 \cdot \varpi_{max}, H = H_{max}$	-0.00166	-0.00175	-0.00153
	$\varpi = 0.7 \cdot \varpi_{max}, H = 0.7 \cdot H_{max}$	-0.00114	-0.00125	-0.00091

Analizom aberacija optimizovanog rastavljenog dublea prikazanih u tabeli 5, vidi se da su sferna aberacija (podužna i poprečna) kao i koma potpuno korigovani što je i bio cilj optimizacije. Poprečna sferna aberacija iznosi od 5  $\mu\text{m}$  do 8  $\mu\text{m}$ , zavisno od talasne dužine odnosno od spektralne linije sa kojom se računa i za maksimalni svetlosni otvor.

Koma iznosi  $2 \mu\text{m}$  za maksimalni ugao vidnog polja i maksimalni svetlosni otvor. Ako se uporede aberacije optimizovanog i polaznog rastavljenog dublea, vidi se da je prilikom optimizacije došlo do smanjenja svih aberacija. Naročito su smanjene koma i distorzija, dok ostale aberacije – sferna aberacija, astigmatizam i krivina polja – nisu značajnije smanjene.



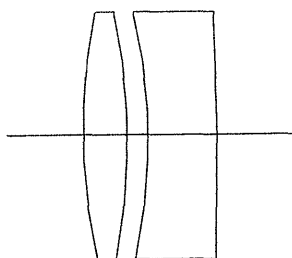
Slika 5. Rastavljeni duble optimizovan pomoću evolucionih strategija metoda GRUP

Aberacije rastavljenog dublea optimizovanog pomoću evolucionih strategija metoda GRUP prikazane su u tabeli 6.

Tabela 6. Aberacije rastavljenog dublea optimizovanog pomoću evolucionih strategija metoda GRUP

Aberacije	Linije spektra		
	d	C	F
Podužna sferna aberacija [mm] $H=H_{\max}$	0.04465	0.05377	0.06712
$H = 0.7 \cdot H_{\max}$	0.01384	0.02659	0.02626
Poprečna sferna aberacija [mm] $H=H_{\max}$	0.00562	0.00676	0.00844
$H = 0.7 \cdot H_{\max}$	0.00121	0.00233	0.00230
Astigmatizam [mm] $\omega = \omega_{\max}$	0.13800		
$\omega = 0.7 \cdot \omega_{\max}$	0.06785		
Krivina polja [mm] $\omega = \omega_{\max}$	-0.17684		
$\omega = 0.7 \cdot \omega_{\max}$	-0.08681		
Distorzija[%] $\omega = \omega_{\max}$	0.00201	-0.00705	0.02804
$\omega = 0.7 \cdot \omega_{\max}$	0.00097	-0.00798	0.02673
Koma [mm] $\omega = \omega_{\max}, H = H_{\max}$	-0.00163	-0.00172	-0.00153
$\omega = \omega_{\max}, H = 0.7 \cdot H_{\max}$	-0.00122	-0.00134	-0.00097
$\omega = 0.7 \cdot \omega_{\max}, H = H_{\max}$	-0.00145	-0.00151	-0.00139
$\omega = 0.7 \cdot \omega_{\max}, H = 0.7 \cdot H_{\max}$	-0.00100	-0.00108	-0.00083

Analizom aberacija optimizovanog rastavljenog dublea prikazanih u tabeli 6, vidi se da su sferna aberacija (podužna i poprečna) kao i koma potpuno korigovani što je i bio cilj optimizacije. Poprečna sferna aberacija iznosi od  $5 \mu\text{m}$  do  $8 \mu\text{m}$  zavisno od talasne dužine, odnosno od spektralne linije sa kojom se računa i za maksimalni svetlosni otvor. Koma iznosi od  $1.5 \mu\text{m}$  do  $1.7 \mu\text{m}$  za maksimalni ugao vidnog polja i maksimalni svetlosni otvor. Ako se uporede aberacije optimizovanog i polaznog rastavljenog dublea, vidi se da je prilikom optimizacije došlo do smanjenja svih aberacija. Naročito su smanjene ko-



ma i distorzija, dok ostale aberacije (sferna aberacija, astigmatizam i krivina polja) nisu značajnije smanjene.

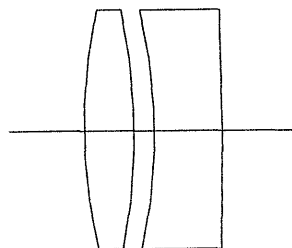
Rastavljeni duble optimizovan pomoću evolucionih strategija metoda REKO prikazan je na sl.6. Prilikom optimizacije izvršena je stroga kontrola debljina sočiva da pojedina sočiva (naročito sabirno) ne postanu previše debela. Način kontrole debljine sočiva kod evolucionih strategija je identičan kao kod adaptivnog stacionarnog genetskog algoritma.

Aberacije rastavljenog dublea optimizovanog pomoću evolucionih strategija metoda REKO prikazane su u tabeli 7.

Tabela 7. Aberacije rastavljenog dublea optimizovanog pomoću evolucionih strategija metoda REKO

Aberacije	Linije spektra		
	d	C	F
Podužna sferna aberacija [mm] $H=H_{\max}$	0.04420	0.05336	0.06655
$H = 0.7 \cdot H_{\max}$	0.01379	0.02654	0.02616
Poprečna sferna aberacija [mm] $H=H_{\max}$	0.00556	0.00671	0.00836
$H = 0.7 \cdot H_{\max}$	0.00121	0.00233	0.00229
Astigmatizam [mm] $\omega = \omega_{\max}$	0.13730		
$\omega = 0.7 \cdot \omega_{\max}$	0.06750		
Krivina polja [mm] $\omega = \omega_{\max}$	-0.17619		
$\omega = 0.7 \cdot \omega_{\max}$	-0.08649		
Distorzija[%] $\omega = \omega_{\max}$	0.00062	-0.00674	0.02252
$\omega = 0.7 \cdot \omega_{\max}$	0.00029	-0.00696	0.02193
Koma [mm] $\omega = \omega_{\max}, H = H_{\max}$	0.00010	0.00003	0.00014
$\omega = \omega_{\max}, H = 0.7 \cdot H_{\max}$	-0.00039	-0.00048	-0.00020
$\omega = 0.7 \cdot \omega_{\max}, H = H_{\max}$	-0.00024	-0.00029	-0.00022
$\omega = 0.7 \cdot \omega_{\max}, H = 0.7 \cdot H_{\max}$	-0.00042	-0.00048	-0.00029

Analizom aberacija optimizovanog rastavljenog dublea prikazanih u tabeli 7, vidi se da su sferna aberacija (podužna i poprečna) kao i koma potpuno korigovani što je i bio cilj optimizacije. Poprečna sferna aberacija iznosi od  $5 \mu\text{m}$  do  $8 \mu\text{m}$ , zavisno od talasne dužine odnosno od spektralne linije sa kojom se računa i za maksimalni svetlosni otvor. Koma je posebno dobro korigovana i iznosi od  $0.3 \mu\text{m}$  do  $1.4 \mu\text{m}$  za maksimalni ugao vidnog polja i maksimalni svetlosni otvor. Ako se uporede aberacije optimizovanog i pol-



Slika 7. Rastavljeni duble optimizovan pomoću evolucionih strategija metoda KORR

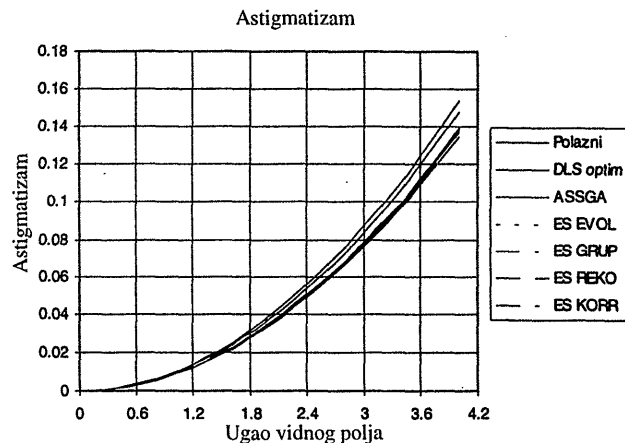
laznog rastavljenog dublea, vidi se da je prilikom optimizacije došlo do smanjenja svih aberacija. Naročito su smanjene koma i distorzija dok ostale aberacije (sferna aberacija, astigmatizam i krivina polja) nisu značajnije smanjene.

Rastavljeni duble optimizovan pomoću evolucionih strategija metoda KORR prikazan je na sl.7. Prilikom optimizacije izvršena je stroga kontrola debljina sočiva da pojedina sočiva (naročito sabirno) ne postanu previše debela. Način kontrole debljine sočiva kod evolucionih strategija je identičan kao kod adaptivnog stacionarnog genetskog algoritma.



evolucionne strategije EVOL, GRUP, REKO i KORR ostavile malo veće vrednosti sferne aberacije da bi dobro korigovali koma i distorziju.

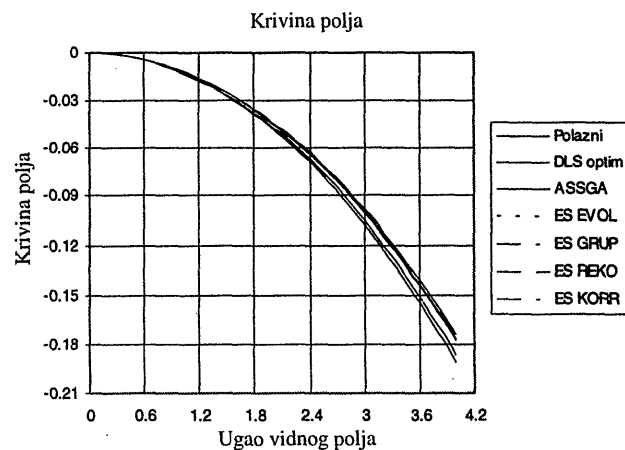
Na slici 11 je dat dijagram astigmatizma za sve razmatrane rastavljene dublee.



Slika 11. Dijagram astigmatizma za rastavljene dublee

Analizom dijagrama astigmatizma, prikazanog na slici 11, vidi se da svi rastavljene dublee imaju veoma slične vrednosti astigmatizma. To se moglo i očekivati jer se kod rastavljenog dublea ne koriguju astigmatizam, krivina polja i distorzija već samo sferna aberacija i koma. Astigmatizam je dovoljno mali i zadovoljava tolerancije aberacija.

Na slici 12 je dat dijagram krivine polja za sve razmatrane rastavljene dublee.



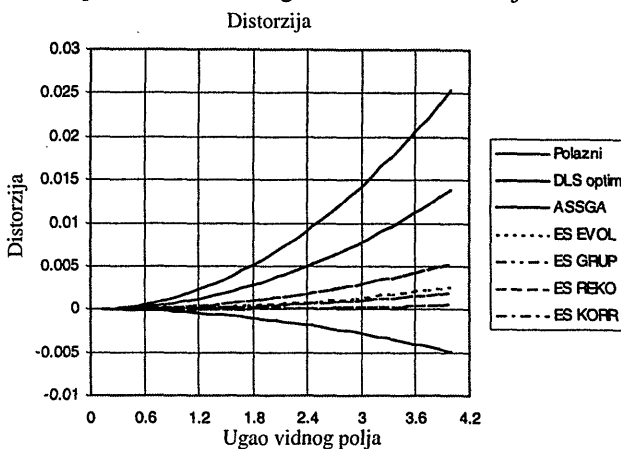
Slika 12. Dijagram krivine polja za rastavljene dublee

Analizom dijagrama krivine polja, prikazanog na slici 12, vidi se da svi rastavljene dublee imaju veoma slične vrednosti krivine polja. To se moglo i očekivati jer se kod rastavljenog dublea ne koriguju astigmatizam, krivina polja i distorzija već samo sferna aberacija i koma. Krivina polja je dovoljno mala i zadovoljava tolerancije aberacija.

Na slici 13 je dat dijagram distorzije za sve razmatrane rastavljene dublee.

Analizom dijagrama distorzije, prikazanog na slici 13, vidi se da rastavljene dublee, koji su optimizovani pomoću evolucionih strategija metode EVOL, GRUP, REKO i KORR, imaju najmanju distorziju koja je značajno manja od distorzije koja je prisutna kod polaznog rastavljenog dublea. Ovo je veoma interesantno jer korekcija distorzije uopšte nije bila prioritet već samo korekcija sferne aberacije i kome. Treba primetiti da su vrednosti distorzije za sve rastavljene dublee, osim za polazni dobro korigovane. Interesantno je zapaziti da su evolucionne strategije EVOL,

GRUP, REKO i KORR ostavile malo veće vrednosti sferne aberacije da bi dobro korigovali koma i distorziju.



Slika 13. Dijagram distorzije za rastavljene dublee

## Zaključak

U ovom radu su prikazani rezultati optimizacija rastavljenog dublea i upoređene su njihove aberacije. Za polazni sistem je izabran dobar patentirani rastavljeni dublee koji je prikazan u [17]. Urađene su optimizacije pomoću sledećih metoda:

- prigušeni najmanji kvadrati;
- adaptivni stacionarni genetski algoritam;
- dvočlane evolucionne strategije varijanta EVOL;
- višočlane evolucionne strategije varijante GRUP, REKO i KORR.

Sve optimizacione metode pronašle su slične optičke sisteme kod kojih se aberacije nisu mnogo razlikovale. Na osnovu toga se može tvrditi da je pronađen optimalni dublee koji zadovoljava sve konstrukcione i aberacione zahteve.

Analizom aberacija može se utvrditi da je kod svih optimizovanih optičkih sistema korigovana poprečna i podužna sferna aberacija i koma. Kod dublea koji su optimizovani pomoću evolucionih strategija pored dobre korekcije podužne i poprečne sferne aberacije i kome, korigovana je i distorzija. Korekcija distorzije je izvršena na račun malog povećanja sferne aberacije što se može videti ako se aberacije ovih dublea uporede s aberacijama rastavljenog dublea optimizovanog pomoću metode prigušenih najmanjih kvadrata. Korekcija astigmatizma i krivine polja nije vršena, jer rastavljene dublee nema dovoljan broj promenljivih parametara koji bi omogućili njihovu korekciju.

## Literatura

- [1] LEVENBERG, K. A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares. *Q. J. Appl. Math.*, 1944, vol.2, p.164-168.
- [2] ROSEN, S., ELDRET, C. Least squares method for optical correction. *J. Opt. Soc. Am.*, 1954, vol.44, p.250-252.
- [3] MEIRON, J. Automatic lens design by the least squares method. *J. Opt. Soc. Am.*, 1959, vol.49, p.293-298.
- [4] MEIRON, J. Damped least squares method for automatic lens design. *J. Opt. Soc. Am.*, 1965, vol.55, p.1105-1109.
- [5] WYNNE, C. Lens designing by electronic digital computer. *Proc. Phys. Soc. London* 1959, vol.73, p.777-783.
- [6] WYNNE, C., WORMELL, P. Lens design by computer. *Appl. Opt.*, 1963, vol.2, no.12, p.1233-1238.
- [7] KIDGER, M., WYNNE, C. The design of double Gauss systems using digital computers. *Appl. Opt.*, 1967, vol.6, no.3, p.553-563.
- [8] Wormell, P. Version 14, a program for the optimization of lens designs. *Opt. Acta*, 1978, vol.25, no.8, p.637-654.



- [9] KIDGER,M. *The application of electronic computers to the design of optical systems, including aspheric lenses*. Ph. D. Thesis, University of London, 1971.
- [10] VASILJEVIĆ,D. *Prilog optimizaciji projektovanja optičkih sistema pomoću mikroracunara*. magistarska teza, Univerzitet u Beogradu, 1990.
- [11] VASILJEVIĆ,D., RIBOŠIĆ,D. Optimizacija u procesu projektovanja optičkih sistema. *Naučno-tehnički pregled*, 1992, vol.XLII, no.2, p.24-31.
- [12] DAVIS,L.ED. *Handbook of Genetic Algorithms*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- [13] VASILJEVIĆ,D. *Mogućnost primene genetskih algoritama u optimizaciji performansi simetričnih objektivna pasivnih nišanskih sprava*. doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu, 1998.
- [14] VASILJEVIĆ,D. Teorijske osnove i programsko rešenje genetskog algoritma primenjenog u optimizaciji optičkih sistema. *Naučno-tehnički pregled*, 1998, vol.XLVIII, no.3, p.30-40.
- [15] SCHWEFEL,H.P. *Evolution and Optimum Seeking*. John Wiley, New York, 1995.
- [16] VASILJEVIĆ,D. Teorijske osnove i programsko rešenje evolucionih strategija primenjenih u optimizaciji optičkih sistema. *Naučno-tehnički pregled*, 1999, vol.XLVIX, no.1, p.29-43.
- [17] COX,A *A System of Optical Design*. Focal Press, London 1964.

Rad primljen: 28.9.1999.god.