

# ALGORITMUS A TRIPLET AUTOMATIKUS TERVEZÉSÉHEZ

KALLÓ PÉTER\*

[Beérkezett: 1974. november 20-án]

Összefoglalóan értékelve az optikai rendszerek eddig ismert automatikus tervezési eljárásainak alkalmazása során szerzett tapasztalatokat, a klasszikus triplet típusú objektív optimalizált, automatikus (és hagyományos) tervezésére alkalmas, kiindulásában és kezdeti szakaszaiban teljesen új algoritmus kerül ismertetésre. A dolgozat részletesen tárgyalja a teljesítménydetermináló paraméterek fogalmának definiálását, a tripletek alapegyenetének levezetését és az üveganyagok megválasztásának összefüggéseit; a hajlítások és a finomkorrekció ismert módszereire csak a legszükségesebb mértékben tér ki. A számítógépre jól programozható formájú, számos optimalizálási lehetőséget biztosító, új algoritmus jelentősége az, hogy a tripletek automatikus (és hagyományos) tervezéséhez kiindulásul csak az előzetesen megadott relatív nyílás, tárgyszög, valamint a felhasználható üvegek adatainak ismeretét igényli és több irányú általánosításra alkalmas (más típusú — ragasztott lencsékét is tartalmazó — optikai rendszerek, véges tárgytávolság, stb.).

## 1. Bevezetés

A klasszikus triplet [1] mintegy nyolc évtizedes tradícióra tekint vissza, a számítógépek alkalmazásának az optikai tervezésben negyedszázados múltja van. Ennek ellenére a legalaposabban megvizsgált optikai rendszer, a triplet elmélete (az ellenkező vélemények [2] dacára) nem tekinthető lezártnak [3], valamint a triplet automatikus tervezésében [4] vannak még továbbra is nyitott kérdések. Jelen közleményben megkíséreljük a triplet elméletét az eddigieknél [3] egzaktabb alapokra helyezni, oly módon, hogy az új összefüggéseket kifejező algoritmusok az automatikus (és a hagyományos [5]) tervezésben előnyösen alkalmazhatók legyenek.

## 2. Az optikai tervezés automatizálásának helyzete [6]

Az optikai rendszerek automatikus tervezési eljárásainak alkalmazása során szerzett tapasztalatokat az alábbiakban foglalhatjuk össze [7], [8]:

2.1. Tetszőleges típusú optikai rendszer automatikus tervezésére mind-  
eddig nem sikerült alkalmas eljárást megalkotni.

\* Dr. Kalló Péter, 1025 Budapest, Kapy u. 26/B.

2.2. Az előzetesen rögzített követelményeket jó közelítéssel kielégítő, adott típusú optikai rendszerek automatikus tervezésére többé-kevésbé megfelelő módszerek ismeretesek, de ezek gyakorlatilag csak a hagyományos tervezési módszerek összefüggései számítógépre alkalmazott változatainak tekinthetők, mert új algoritmusokat nem tartalmaznak (speciális eljárások).

2.3. Az optikai rendszerek (hagyományos és) automatikus tervezési módszereinek sikeressége a kiindulástól döntő mértékben függ.

2.4. A képalkotással szemben támasztott követelmények szempontjából az optikai rendszer viselkedését leíró sokváltozós függvény(-ek)nek több minimuma van. Az adott kiindulásból adott módszerrel meghatározott minimumról azonban nem lehet tudni azt, hogy az az összes lehetséges minimumok közül melyik, azaz a legkisebbek közül való-e?

2.5. Az előző, 2.3., 2.4. pontban foglalt bizonytalanságokra vezethető vissza többek között az adott típusú optikai rendszerek automatikus tervezésére használható speciális (és a csak finomkorrekcióra alkalmas) eljárások vezérlési elveinek (merit function), valamint matematikai módszereinek sokasága. Nem tekinthető alaptalannak az az állítás, hogy e területen sok esetben a matematikai módszerek és szimbólumok útvesztőit sajnálatos módon az optikai tervezés lényegének fizikai tartalma és célkitűzései sínylik meg.

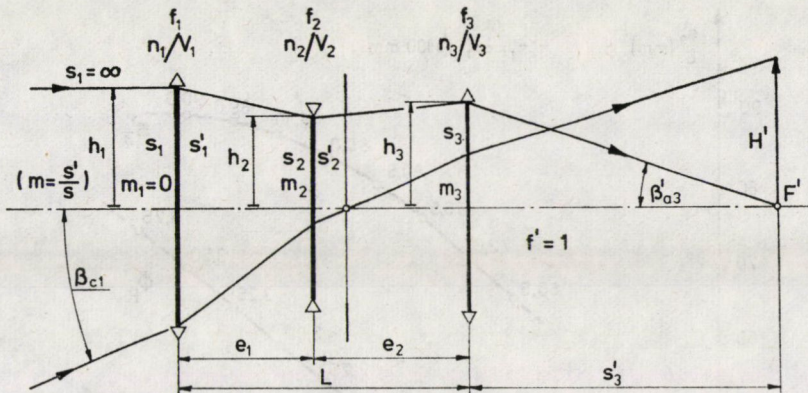
A dolgozat címében foglalt célkitűzést részletezve és körülhatárolva, a továbbiakban a távoli tárgyra korrigált ( $s_1 = \infty$ ) triplet típusú objektív automatikus tervezése algoritmusának meghatározásánál első sorban a 2.3., 2.4., 2.5. pontokban foglalt bizonytalanságok kiküszöbölésére és az általánosíthatóság biztosítására (2.1.) törekszünk.

A triplet automatikus tervezéséhez ajánlott algoritmusnak olyannak kell lennie, hogy az azt alkalmazó program segítségével, a triplettel szemben támasztott relatív nyílás, tárgyszög, valamint a rendelkezésre álló üvegtábla adatok megadása után a számítógép a korrigált rendszer szerkezeti jellemzőit (rádiuszok, légközők, vastagságok értékei, üvegek típusjelei) emberi beavatkozás nélkül számítsa ki, illetve válassza meg.

### 3. A teljesítménydetermináló paraméterek fogalmának bevezetése

A (hagyományos és automatikus) optikai tervezés nehézségeinek túlnyomó többsége a helyes kiindulás megválasztásában összpontosul (2.3.), illetve arra vezethető vissza.

Ezért látszik indokoltnak az, ha a kiindulásnál szereplő adatokat teljesítménydetermináló paramétereknek tekintjük. Az 1. ábrának megfelelően értelmezett jelölések alkalmazásával a triplet teljesítménydetermináló paramétereit két, jól elkülönülő csoportra oszthatjuk.



1. ábra. Jelölések.

A külső teljesítménydetermináló paraméterek a triplet egészére vonatkozó  $s_3'$  képtávolság és  $L$  szerkezeti hossz (rendszerjellemezők). A belső teljesítménydetermináló paraméterek a triplet komponenseinek  $f_1, f_2, f_3$  fókusz-távolságai, valamint az azokat egymástól elválasztó  $e_1, e_2$  légtávok.

A teljesítménydetermináló paramétereken nyugvó szemléletmódnak az az előnye, hogy segítségével feloldhatók az optikai tervezés kezdeti szakaszának nehézségei, mert az összefüggések feltárása két lépésben történhetik:

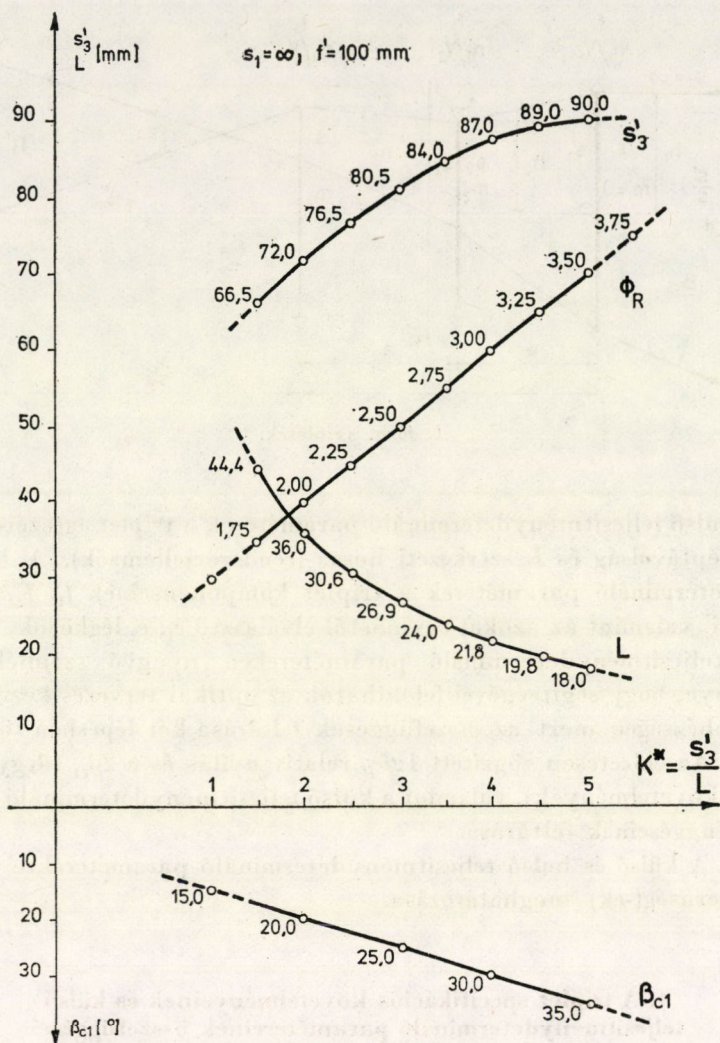
3.1. Az előzetesen rögzített  $1:\Phi_R$  relatív nyílás és a  $2\beta_{c1}$  tárgyyszög (specifikációs követelmények), valamint a külső teljesítménydetermináló paraméterek összefüggéseinek feltárása.

3.2. A külső és belső teljesítménydetermináló paraméterekre vonatkozó törvényszerűség(-ek) meghatározása.

#### 4. A triplet specifikációs követelményeinek és külső teljesítménydetermináló paramétereinek összefüggései

Mint hogy a szakirodalomból számos korrigált triplet összetartozó specifikációs adata és szerkezeti jellemzője ismeretes, a külső teljesítménydetermináló paramétereknek és a specifikációs követelményeknek az összefüggései empirikus úton jól megközelíthetők.

Az I. táblázatban feltüntetett forrásokból származó tizenöt tripletet vizsgáltunk meg. Meghatároztuk az egyes tripletvek vékony rendszerét, majd a megfelelő jellemzőket rendezve az összefüggéseket grafikusán ábrázoltuk (2. ábra). A grafikonok nem tartalmazzák már a tizenöt triplet vékony rendszerének individuális adatainak a szórását, mert azok a 2. ábrát áttekinthetetlenül zsúfolttá tették volna. Az  $s_3'$  képtávolságnak és az  $L$  szerkezeti hosszának a grafikonok által reprezentált összetartozó adatait a megvizsgált tizenöt triplet



2. ábra. A specifikációs adatok és a külső teljesítménydetermináló paraméterek összefüggései.

megfelelő adataitól legfeljebb 10%-kal térnek el. Ez a pontosság a külső teljesítménydetermináló paraméterek értékeinek a meghatározásánál — azzal az előnnyel, hogy az összefüggések grafikusán is áttekinthetők — a gyakorlat által támasztott igényeket jól kielégíti.

A specifikációs követelményeket és a tripletek külső teljesítménydetermináló paramétereinek összefüggéseit tükröző, a 2. ábrán megadott görbék azt mutatják, hogy az  $s'_3/L$  függvényében ábrázolt  $\Phi_R$  reciprok relatív nyílás és a  $\beta_{c1}$  fél tárgyszög grafikonja egyenes. A grafikonok alkalmazása a következő: a követelményként adott  $1 : \Phi_R$  relatív nyílás és  $\beta_{c1}$  fél tárgyszög érté-

I. táblázat

Sorszám	Forrás	Tervező
1	Brit. Pat 155640	H. W. LEE
2	USA Pat. 2,503,751	W. LITTEN
3	USA Pat. 2,731,884	T. BRENDEL
4	USA Pat. 2,818,777	L. HUDSON
5	E. P. 364994	R. RICHTER
6	USA Pat. 1,987,878	A. W. TRONNIER
7	USA Pat. 2,720,816	I. C. SANDBACK
8	Rozprawy VED	M. MALY
9	USA Pat. 2,270,234	A. WARMISHAM
10	JOSA, 1960. 3.	J. MEIRON
11	USA Pat. 2,298,090	A. WARMISHAM
12	Kép- és Hangtechn. (1970), I	KALLÓ P.

kekről megállapítjuk, hogy azok triplet típusú objektívvel kielégíthetők-e, azaz a  $\beta_{c1}$  fél tárgyszög értéknek a  $\Phi_R$  reciproknak relatív nyílás értékkel jó közelítéssel azonos ordinátán kell elhelyezkednie. Ha a  $\beta_{c1}$  fél tárgyszög értéke a grafikon által megengedettnél nagyobb, a követelmények triplettel nem elégíthetők ki; ha kisebb, akkor a triplet nincs kihasználva (vagy pl. a szokásosnál kedvezőbb mértékű vinnyettálást tűzünk célul) és lehetséges, hogy a követelmények esetleg tripletnél egyszerűbb rendszerrel is teljesíthetők. Ezután a  $\Phi_R$  reciproknak relatív nyílás értékhez tartozó  $s'_3$  képtávolság és  $L$  szerkezeti hossz adatot az adott  $\Phi_R$  értékhez tartozó ordináta mentén a megfelelő görbe segítségével leolvashatjuk.

### 5. A triplet külső és belső teljesítménydetermináló paramétereinek összefüggései. A tripletek alapegyenlete

A 4. pontban ismertetett módon a specifikációs követelményeknek megfelelő külső teljesítménydetermináló paramétereket, az  $s'_3$  képtávolságot és az  $L$  szerkezeti hosszat grafikus formában határoztuk meg. A külső és a belső teljesítménydetermináló paraméterek összefüggéseinek levezetésénél az 1. ábrán feltüntetett jelöléseket alkalmazva ( $\Sigma f = 1$ ,  $s_1 = \infty$ ) az alábbi feltételi egyenletekből indultunk ki:

$$L = e_1 + e_2 \quad \longrightarrow \quad e_2 = L - e_1 \quad (1)$$

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{f_1}{f_1 - e_1} \quad \longrightarrow \quad h_2 = \frac{h_1(f_1 - e_1)}{f_1} \quad (2)$$

$$f_1 m_2 m_3 = 1 \quad \longrightarrow \quad m_2 = \frac{1}{f_1 m_3} \quad (3)$$

$$m_2 = \frac{\frac{s'_3}{m_3} + L - e_1}{f_1 - e_1} \quad (4)$$

$$m_3 + \frac{s'_3}{f_3} = 1 \quad \longrightarrow \quad m_3 = \frac{f_3 - s'_3}{f_3} \quad (5)$$

$$\frac{1}{m_2} = 1 + \frac{f_1 - e_1}{f_2} \quad \longrightarrow \quad e_1 = f_1 + f_2 - \frac{f_2}{m_2} \quad (6)$$

A fenti (1) – (6) egyenletrendszer  $s'_3$ ,  $L$  és  $\Phi_R(h_1)$  megadása esetén az alábbi nyolc ismeretlent tartalmazza:

$$\begin{array}{ccccc} f_1 & & f_2 & & f_3 \\ & e_1 & & e_2 & \\ & & m_2 & & m_3 \\ & & & h_2 & \end{array} \quad (7)$$

ugyanis a  $\Phi_R$  reciprok relatív nyílás nagyságának ismeretében a  $h_3$  értéke

$$h_3 = s'_3 h_1. \quad (8)$$

Behelyettesítve az (5) egyenletből az  $m_3$  értékét a (3)-ba, valamint az így kapott  $m_2$  értékét a (6)-ba, az

$$m_2 = \frac{f_3}{f_1(f_3 - s'_3)}, \quad (9)$$

illetve az

$$e_1 = f_1 + f_2 - \frac{f_1 f_2 (f_3 - s'_3)}{f_3} \quad (10)$$

egyenletekhez jutunk.

Miután a (4) és (9) egyenletek bal oldala azonos, jobb oldalainak egyenlőknek kell lenniök; behelyettesítve továbbá  $e_1$  kifejezését a (10)-ból, illetve az  $m_3$  értékét az (5)-ből, az alábbi egyenletet kapjuk:

$$\frac{f_3}{f_1(f_3 - s'_3)} = \frac{\frac{s'_3 f_3}{f_3 - s'_3} + L - f_1 - f_2 + \frac{f_1 f_2 (f_3 - s'_3)}{f_3}}{f_1 - f_1 - f_2 + \frac{f_1 f_2 (f_3 - s'_3)}{f_3}}, \quad (11)$$

amely jobb oldala számlálójának és nevezőjének utolsó két tagja azonos, s ezért az alábbi alakba írható át:

$$\frac{f_3}{f_1(f_3 - s'_3)} = \frac{(L - f_1)(f_3 - s'_3) + s'_3 f_3}{f_2[-f_3 + f_1(f_3 - s'_3)]} + 1. \quad (12)$$

Egyszerűsítés után:

$$\frac{f_2[f_3 - f_1(f_3 - s'_3)]}{f_1} = \frac{f_3[(L - f_1)(f_3 - s'_3) + s'_3 f_3]}{f_1(f_3 - s'_3) - f_3}. \quad (13)$$

Kifejezve a (13)-ból az  $f_2$  értékét, a tripletek alapegyenletét kapjuk:

$$f_2 = - \frac{f_1 f_3 [(L - f_1)(f_3 - s'_3) + s'_3 f_3]}{[f_1(f_3 - s'_3) - f_3]^2}. \quad (14)$$

Tekintettel az alapegyenlet egyszerűségére és arra, hogy a komponensek  $f_1, f_2, f_3$  fókusz távolságainak összes lehetséges értékei viszonylag szűk tartományban helyezkednek el,  $f_1$  és  $f_3$  megfelelő lépésközének megválasztása után a negatív lencse  $f_2$  fókusz távolságainak értékei meghatározhatók, és az optikális változatok szelektálhatók; a légközők, valamint — a relatív nyílás megadása után — az aperturasugár belépési magasságainak meghatározása a (10), (1), (2) és (8) egyenletek alkalmazásával már nem jelent nehézséget.

## 6. A rekesz helyének megválasztása és az alaktól független képalkotási hibák tűréseire vonatkozó megfontolások

A teljesítménydetermináló paraméterek közötti alapvető összefüggések, (2. ábra, (14) alapegyenlet) feltárása eredményeképpen az előzetesen megadott  $(\Phi_R, 2\beta_{cl})$  specifikációs követelményekből kiindulva meg tudjuk határozni a legkedvezőbb (pl. maximális abszolút értékekkel rendelkező)  $f_1, f_2, f_3$  fókusz távolsághármassal jellemzett vékony tripleteket, amelyeknek ismerjük az  $e_1, e_2$  légközeit és  $h_1, h_2, h_3$  aperturasugár belépő magasságait is. Az alaktól független képalkotási hibák közül a longitudinális színhiba, valamint a Petzvál-képmezőhajlás harmadrendben közelítő egyenletének felírásához a fenti adatok elegendők, a transzverzális színhiba esetében viszont szükséges ismerni a rekesz helyét is. A rekeszhely megválasztásával kapcsolatban a következő megfontolásokat tehetjük.

Ismeretes, hogy a harmadrendű képalkotási hibák közül a transzverzális színhiba, az asztigmatizmus és a torzítás függ a rekeszhelytől (a centrális koma — a szerkezeti hossz középső tartományában elhelyezett rekesz esetén — gyakorlatilag nem függ a rekeszhelytől). Ha a torzítással szemben támasztott

II. táblázat

Sor- szám	$\Phi_R$	$\beta'_{\alpha_3}$	$H'_3$ , mm	$\beta'_{c_3}$	A tűrések értékei, mm		
					$T_1 = \frac{f\lambda}{2H'_3 \sin \beta'_{\alpha_3}}$	$T_2 = \frac{\lambda}{\sin^2 \beta'_{\alpha_3}}$	$T_3 = \frac{0,025}{\sin \beta'_{\alpha_3}}$
1	1,75	16,0	22,1	12,5	0,00452	0,00728	0,0910
2	2,00	14,1	26,7	15,0	0,00425	0,00933	0,103
3	2,25	12,6	31,5	17,5	0,00402	0,0116	0,115
4	2,50	11,3	36,3	20,0	0,00388	0,0143	0,128
5	2,75	10,3	41,3	22,5	0,00377	0,0172	0,140
6	3,00	9,50	46,5	25,0	0,00356	0,0202	0,152
7	3,25	8,80	51,8	27,5	0,00347	0,0235	0,163
8	3,50	8,20	57,7	30,0	0,00337	0,0273	0,176

követelmények nem rendkívül szigorúak, akkor a torzítás korrekcióját potenciónálisan a szerkezeti hossz felezőpontja környezetében elhelyezett rekesz biztosítja. Ebben az esetben általában asztigmatizmusnehézségek sem lépnek fel — tehát erre a rekeszhelyre vonatkozóan kell a transzverzális színhibát kiegyenlíteni.

A korábbiak alapján rendelkezésünkre álló vékony tripletek az  $e_1$ ,  $e_2$  légközők szempontjából tehát az alábbi feltételek teljesülése szerint szelektálhatók

$$|e_1 - e_2| < 0,06 \Sigma f, \text{ vagy } \sim 0,1 \Sigma f > |e_1 - e_2| > 0,06 \Sigma f, \quad (15)$$

(amelyben  $\Sigma f$  a vékony triplet eredő fókusz távolsága).

Az első egyenlőtlenséget kielégítő nagyságú légközőkkel rendelkező vékony tripletek olyan objektívek kiindulásául alkalmasak, amelyekbe nem kívánunk változtatható átmérőjű rekeszt elhelyezni (a rekesz ez esetben a középső lencse foglalata). A második egyenlőtlenséget kielégítő nagyságú légközőkkel rendelkező tripletek azon objektívek kiindulásául alkalmasak, amelyekbe változtatható átmérőjű rekesz kell, hogy elhelyezhető legyen. Ekkor a rekesz helye a nagyobbik légközőben a középső lencse közvetlen közelében van.

Végül meg kívánjuk jegyezni, hogy a továbbiakban, az alaktól és a rekeszhelytől függő képalkotási hibák (első sorban az asztigmatizmus) korrekciója során esetenként szükséges a rekeszhely módosítása, ez azonban nem olyan mértékű, hogy a transzverzális színhiba korábbi korrigáltságának mértékét jelentősen befolyásolná.

A továbbiakban a tripletekkel szemben támasztható reális követelményeket alapul véve a 2. táblázatban a különböző  $1:\Phi_R$  relatív nyílásokhoz tartozó  $\beta'_{\alpha_3}$  kilépő apertúraszöveget és  $H'_3$  képmagasságot tüntettük fel, valamint meghatároztuk az ezekhez tartozó  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  képalkotási tűréseket a transzverzális és longitudinális színhiba, valamint a Petzvál-képmezőhajlás esetében.



Ismeretes, hogy a II. táblázatban feltüntetett relatív nyílás és képszög (képmagasság) követelmények mellett a tripletok — viszonylagos egyszerűségük miatt — nem biztosítják azt, hogy a harmadrendű maradék képalkotási hibák nagyságai ne haladják jelentősen meg a megfelelő tűrésekben foglalt értékeket. Ezért a 2. táblázat adatai alapján valamennyi szóbjövő triplet esetére önkényesen az alábbi tűrésértékeket választjuk ( $\Sigma f = 100$  mm):

$$T_1 = 4 \cdot 10^{-3} \quad T_2 = 5 T_1 \quad T_3 = 50 T_1 \quad [\text{mm}]. \quad (16)$$

### 7. Az alaktól független harmadrendű képalkotási hibák optimális kiegyenlítését biztosító üvegek összetartozó törésmutatóinak és Abbe-számainak meghatározása

Mint hogy a képalkotási tűrések számértékét értelemszerűen  $\pm$  előjellel vesszük figyelembe, elegendő, ha az alaktól független képalkotási hibák abszolút értékeire írjuk fel a harmadrendű egyenleteket, amelyek a Petzvál-képmezőhajlás, valamint a longitudinális és transzverzális színhiba sorrendjében az alábbiak [9]:

$$\frac{1}{2} H_3'^2 \left[ \frac{1}{f_1 n_1} + \frac{1}{f_2 n_2} + \frac{1}{f_3 n_3} \right] = p \cdot 50 T_1, \quad (17)$$

$$\frac{s_3'^2}{a_3^2} \left[ \frac{a_1^2}{f_1 V_1} + \frac{a_2^2}{f_2 V_2} + \frac{a_3^2}{f_3 V_3} \right] = p \cdot 5 T_1, \quad (18)$$

$$H_3' \left[ \frac{a_1 b_1}{f_1 V_1} + \frac{a_2 b_2}{f_2 V_2} + \frac{a_3 b_3}{f_3 V_3} \right] = p \cdot T_1. \quad (19)$$

A fenti képletekben az eddig elő nem fordult jelölések értelmezése az alábbi:

$p$  arányossági tényező, amely arra utal, hogy az üvegekészlet korlátozottsága miatt az alaktól független képalkotási maradék hibák csak megközelítik, de nem érik el a tűrésekben foglalt ideális értékeket (a gyakorlatban ezért  $p$  számértéke mindig nagyobb az egységnél), továbbá a három lencsére vonatkozóan  $a_1, a_2, a_3$  viszonyszámok, az apertúrasugár belépő magasságának és az apertúrarekesz átmérője felének hányadosai,  $b_1, b_2, b_3$  a rekeszfaktorok, a centrális fősugár belépő magasságának és azon szög tangensének hányadosa, amelyet a centrális fősugár az apertúrarekesz középpontján áthaladva az optikai tengellyel be zár 9].

Osszuk el a (17), (18), (19) feltételi egyenleteket a bal oldalukon szereplő együtthatókkal és vezessük be az alábbi jelöléseket:

$$c_1 = \frac{2 \cdot 50 T_1}{H_3'^2}, \quad c_2 = \frac{5 T_1 a_3^2}{s_3'^2}, \quad c_3 = \frac{T_1}{H_3'}, \quad (20)$$

amelyeket behelyettesítve a (17), (18), (19) feltételi egyenletbe az alábbiakat kapjuk:

$$\frac{1}{f_1 n_1} + \frac{1}{f_2 n_2} + \frac{1}{f_3 n_3} = c_1 p, \quad (21)$$

$$\frac{a_1}{V_1 f_1} + \frac{a_2}{V_2 f_2} + \frac{a_3}{V_3 f_3} = c_2 p, \quad (22)$$

$$\frac{a_1 b_1}{V_1 f_1} + \frac{a_2 b_2}{V_2 f_2} + \frac{a_3 b_3}{V_3 f_3} = c_3 p. \quad (23)$$

A fenti három egyenlet közül a továbbiakban foglalkozunk a (22) és (23) egyenlettel, célul tűzve az Abbe-számok közötti összefüggések feltárását. Fejezzük ki mindkét egyenletből az  $a_1/(V_1 f_1)$  értékét:

$$\frac{a_1}{V_1 f_1} = c_2 p - \frac{a_2}{V_2 f_2} - \frac{a_3}{V_3 f_3}, \quad (24)$$

$$\frac{a_1}{V_1 f_1} = \frac{c_3 p}{b_1} - \frac{a_2 b_2}{V_2 f_2 b_1} - \frac{a_3 b_3}{V_3 f_3 b_1}. \quad (25)$$

A (24) és (25) egyenletek bal oldalainak egyenlőségéből következik jobb oldaluk egyenlősége, azaz:

$$c_2 p - \frac{a_2}{V_2 f_2} - \frac{a_3}{V_3 f_3} = \frac{c_3 p}{b_1} - \frac{a_2 b_2}{V_2 f_2 b_1} - \frac{a_3 b_3}{V_3 f_3 b_1}. \quad (26)$$

Fejezzük ki  $V_3$ -t a  $V_2$  függvényében célszerűen az alábbi módon:

$$-\frac{a_3}{V_3 f_3} + \frac{a_3 b_3}{V_3 f_3 b_1} = \left( \frac{c_3}{b_1} - c_2 \right) p + \frac{a_2}{V_2 f_2} - \frac{a_2 b_2}{V_2 f_2 b_1}, \quad (27)$$

$$\frac{1}{V_3} \left[ \frac{a_3 b_3}{f_3 b_1} - \frac{a_3}{f_3} \right] = \frac{1}{V_2} \left[ -\frac{a_2 b_2}{f_2 b_1} + \frac{a_2}{f_2} \right] + p \left( \frac{c_3}{b_1} - c_2 \right), \quad (28)$$

$$\frac{1}{V_3} = \frac{1}{V_2} \left[ \frac{a_2 f_3 (b_1 - b_2)}{a_3 f_2 (b_3 - b_1)} \right] + \left[ \frac{f_3 (c_3 - c_2 b_1)}{a_3 (b_3 - b_1)} \right] p. \quad (29)$$

Végül, ha a (24) és (25) egyenlethez hasonlóan az  $a_1/(V_1 f_1)$  helyett az  $a_3/(V_3 f_3)$ -t fejezzük ki és elvégezzük a fentieknek megfelelő (26)–(28) levezetést, akkor az

$$\frac{1}{V_1} = \frac{1}{V_2} \left[ \frac{a_2 f_1 (b_3 - b_2)}{a_1 f_2 (b_1 - b_3)} \right] + \left[ \frac{f_1 (c_3 - c_2 b_3)}{a_1 (b_1 - b_3)} \right] p \quad (30)$$

összefüggést kapjuk.

A (29) és (30) algoritmusok a (21) feltételi egyenlettel együtt az alábbi módon alkalmazhatók a triplet alaktól független képalkotási hibáinak kiegyenlítését jó közelítéssel biztosító üvegek összetartozó Abbe-számainak és törésmutatóinak meghatározására.

Ismeretesnek tételezzük fel a rendelkezésre álló üvegekészlet összetartozó Abbe-szám és törésmutató adatait. A (29) és (30) algoritmusok segítségével generálhatók a  $V_1$  és  $V_3$  értékek a  $V_2$  függvényében, azaz rendelkezésünkre állnak a színhibákat jó közelítéssel kiegyenlítő  $V_1, V_2, V_3$  Abbe-szám hármasok, amelyeket felül kell vizsgálni abból a szempontból, hogy van-e a számított  $V_1$  és  $V_3$  Abbe-számokat kielégítően megközelítő Abbe-számú üveg a rendelkezésre álló készletben. Végül a reális  $V_1, V_2, V_3$  Abbe-számok célszerűen szűk (pl.  $\Delta V = \pm 3$ ) környezetéhez tartozó megfelelő törésmutatókat rendre a (21) egyenletbe helyettesítve törekszünk  $C_1 p$  értékének minél jobb megközelítésére. Amennyiben az optimális változat esetében a (21)-ből számítható  $p$  értéke lényegesen nagyobb a (29) és (30) algoritmusokban alkalmazott  $p$  értékénél, célszerű új, az eredetinelül megfelelően nagyobb  $p$  értékkel az egész eljárást megismételni mindhárom alaktól független képalkotási hibának a megfelelő tűréstől való „egyenszilárd” eltérésének jó megközelítése érdekében (szukcesszív approximáció).

Végül meg szeretnénk említeni, hogy az ismertetett módszer alkalmazható akkor is, ha pl. különleges követelmények miatt egyes alaktól független képalkotási hibákat mások rovására előnyben kívánunk részesíteni. Szemléltessük ezt egy konkrét eset kapcsán. Nagy relatív nyílású és kis képszögű triplet tervezése esetén a longitudinális színhiba korrigálása elsődleges lehet a transzverzális színhibával és a Petzvál-képzőhajlással szemben. Ezért a (20) konstansok meghatározásakor a  $C_2$  értékét változatlanul hagyjuk, a  $C_1$  és  $C_3$  értékeket növeljük. Az így kapott új, a feladatnak inkább megfelelő, csillaggal jelölt konstansok értékei a (20) alapján például az alábbiak lehetnek:

$$C_1^* = 5C_1, \quad C_2^* = C_2, \quad C_3^* = 2C_1. \quad (31)$$

### 8. Az alaktól függő képalkotási hibák kiegyenlítése

Ha a torzítással szemben támasztott követelmény nem túlzottan szigorú (1 ... 3%), akkor a rekeszhely megválasztásakor (6) a torzítás alaktól független feltételének kielégítésével a torzítás kiegyenlítése a többi alaktól függő képalkotási hiba kompenzálásakor — azokkal együtt — bekövetkezik. A vékony rendszer hajlítását célszerűen a Coddington-Taylor egyenletek [9] alkalmazásával végezzük el, a részletekre nem térünk ki, a strukturális bemutatásra szorítkozunk csupán. A nyíláshiba, a centrális koma és az asztigmatizmus harmadrendű képhiba egyenletében szereplő mennyiségeket a III. táblázatban foglaljuk össze.

III. táblázat

A vékony triplet képalkotási hibája	függ										
	$n_i$	$f_i$	$\pi_i$	$a_i$	$b_i$	$b_i$	$\varrho$	$s'_i$	$H'_i$	$\sigma_i$	
Nyíláshiba, $\Delta S'$	x	x	x	x			x	x		x	
Centrális koma, $\Delta K'_c$	x	x	x			x		x		x	
Asztigmatizmus, $\Delta A'$	x	x	x	x	x				x	x	

Megjegyzés: 1.  $i = 1, 2, 3$

2. A képalkotási hibák az x-szel megjelölt mennyiségektől függenek.

A III. táblázatban az eddig elő nem fordult jelölésekre vonatkozóan:

$\varrho$  az apertúrarekesz sugara,

$\pi_i$  a komponensek helyzetfaktora,

$\sigma_i$  a komponensek alakfaktora.

Ismeretes, hogy az egyes lencsék nyíláshibája és asztigmatizmusa a megfelelő alakfaktornak másodfokú, a centrális koma pedig lineáris függvénye [9]. A triplet vékony rendszere egészének egyes képalkotási hibáit a komponensek egynemű képalkotási hibáinak összegzésével nyerhetjük. Jelen feladatunk azon alakfaktorhármas meghatározása, amelyek esetében a triplet:

1. fenti három alaktól függő képalkotási hibájának együttes értéke nulla,
2. nyíláshibája minimum és centrális komája, valamint asztigmatizmusa nulla.

Mint hogy három egyenletünk van három ismeretlennel, a  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  alakfaktorok értékei meghatározhatók. (Ha a torzítás értéke nem kielégítően alacsony, szukcesszív approximációt kell alkalmazni a torzítás egyenletének figyelembevételé miatt). A feladat megoldását megkönnyíti az a számítási gyakorlatból eredő tapasztalat, mely szerint tripletek esetében:

$$+ 0,5 < \sigma_1 < + 2,5 \text{ és } + 0,5 > \sigma_2, \text{ illetve } \sigma_3 > - 1,5.$$

Amennyiben a fent említett két eset közül a 2. eset áll fenn, azaz  $\Delta S' = \Delta S'_{\min}$  és  $\Delta K'_c = 0, \Delta A' = 0$  (ahol  $\Delta S'$  a nyíláshiba,  $\Delta K'_c$  a centrális koma,  $\Delta A'$  az asztigmatizmus), akkor  $\Delta S'_{\min} \geq 5$  mm esetén a triplet nem korrigálható (a változatot el kell vetni),  $\Delta S'_{\min} < 5$  mm esetében pedig a második lencse törésmutatójának növelésével (közel változatlan Abbe-szám mellett) a  $\Delta S'_{\min}$  értékét legalább  $1 \div 2$  mm-re kell mérsékelni. Ha ez elérhető, a rendszer nagy valószínűséggel korrigálható, ha nem, akkor a változattal tovább foglalkozni nem látszik célszerűnek ( $\Sigma f = 100$  mm).

### 9. Finomkorrekció

Az előző fejezetben részletezett módon kiszámított  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  és  $\sigma_3$  alakfaktorok ismeretében meghatározzuk a triplet három komponensének elülső görbületi sugarait. A három lencse  $d_1$ ,  $d_2$  és  $d_3$  vastagságait az  $1 : \Phi_R$  relatív nyílás függvényében a IV. táblázatban foglaljuk össze. (Megjegyezzük, hogy a IV. táblázatban feltüntetett lencsevastagságok értékeit biztonsággal adtuk meg, amelyek esetlegesen nagyobbak a szükségesnél, ezek azonban a finomkorrekció folyamán többnyire kedvezőbb kiindulást rögzítenek.) A három lencse második görbületi sugarait az  $f_1$ ,  $f_2$  és  $f_3$  fókusztávolságok változatlan nagyságának feltételéből kiindulva határozzuk meg. Végül a vékony rendszer  $e_1$ ,  $e_2$  légközeit és a rekesz elhelyezését a vastag lencsék fősíkjai elhelyezkedésének megfelelően módosítjuk. Az ily módon minden adatával jellemzett vastag triplet alaktól függő maradék képalkotási hibáinak nagyságai az eredő fókusztávolság  $1 \div 2\%$ -át és a torzítás esetében az  $1 \div 3\%$ -ot nem haladják meg.

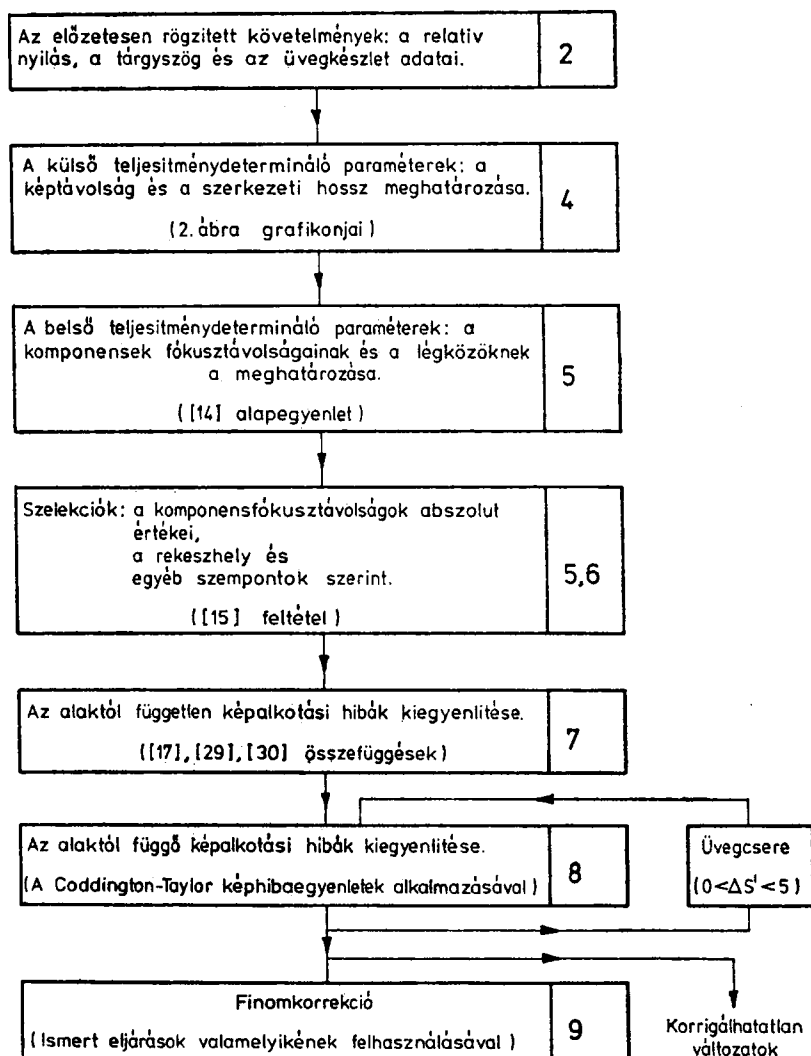
A triplet hátra levő korrigálásával nem kívánunk részletesen foglalkozni, mert az optikai tervezés végső, finomkorrekciós szakasza tekinthető az optikai számítások legeredményesebben gépesített, automatizált területének. Elegendőnek tartjuk e helyen hivatkozni az irodalomra [10], [11] (és hivatkozásait). Ezt az elhatározást a fentiekén kívül különösen indokolja még az a tény, hogy a korábbiakban megkülönböztetett gondossággal törekedtünk a teljesítménydetermináló paramétereik miatt optimális változatok meghatározására.

Az áttekinthetőség céljából a jelen cikkben foglaltakat összegezve, gondolatmenetünket a 3. ábrán megadott, a megfelelő fejezetszámokkal kiegészített blokkvázlattal szemléltetjük. Végül az eddigiekben ismertetett algoritmus helyességét és eredményes alkalmazhatóságát igazolják a [3], valamint az V. táblázatban feltüntetett adatokkal és a 4. ábrán megrajzolt teljesítménygörbékkel jellemzett, szélsőséges specifikációs követelményeket kielégítő, hagyományos eljárással (számítógép alkalmazása nélkül) tervezett tripletok [12].

IV. táblázat

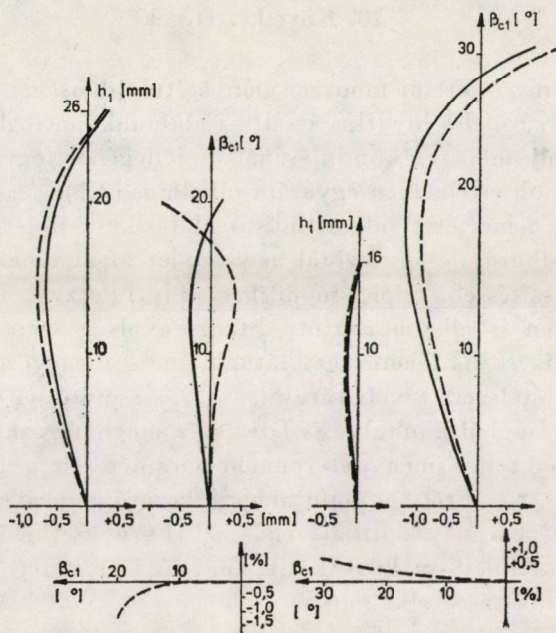
Relatív nyílás $1 = \Phi_R$								
	1:1,75	1:2,00	1:2,25	1:2,50	1:2,75	1:3,00	1:3,25	1:3,50
Lencsevastagság, mm								
$d_1$		10,0		8,0			6,0	
$d_2$		4,0		3,0			2,0	
$d_3$		8,0		7,0			6,0	

(A triplet eredő fókusztávolsága  $f' = 100$  mm).



3. ábra. A triplet automatikus tervezésének blokkvázlata.

A 3. ábra blokkvázlatában összefoglalt és részleteiben ismertetett új algoritmus lehetővé teszi a triplet automatikus tervezését megvalósító program elkészítését. Érdeklődési körünk, beállítottságunk és lehetőségeink miatt a program elkészítése nem tartozik célkitűzéseink közé, mert e helyett inkább a jelenlegihez hasonló, további vizsgálatok végrehajtásával (pl. a 10.1 pontban foglaltak) kívánunk foglalkozni.



4. ábra. Az V. táblázatban feltüntetett adatokkal jellemzett tripletok teljesítménygörbéi

V. táblázat

Triplet,  $\Sigma f = 100$ ; 1 : 1,9;  $2 \times 20^\circ$

Lencse	Görbületi sugár, $r$ , mm	Vastagság, $d$ , mm	Léghöz, $e$ , mm	Törésmutató, $n_s$	Abbeszám, $v_s$
I.	+ 48,57	9,62	15,00	1,79219	50,24
	+ 217,1				
II.	- 111,6	12,22	10,10	1,62118	30,67
	+ 37,51				
III.	+ 82,72	5,77		1,79219	50,24
	- 96,18				

Triplet,  $\Sigma f = 100$ ; 1 : 3,2;  $2 \times 30^\circ$

I.	+ 62,69	7,84	8,59	1,88580	40,77
	+ 800,1				
II.	- 62,69	5,81	8,72	1,62118	30,67
	+ 64,21				
III.	$\infty$	5,56		1,88580	40,77
	- 57,76				

## 10. Következtetések

A most ismertetett új módszer előnyös tulajdonságai (a 2. pontban felsoroltakra való zárójeles hivatkozással) az alábbiakban foglalhatók össze:

10.1. Az új módszer kiindulásánál és jellegénél fogva általánosításra szűkebb és bővebb értelemben egyaránt alkalmas (2.1).

A jelenleg ismertetett algoritmus a klasszikus triplet automatikus tervezésére használható, de az ekvivalens szimplet fogalmának bevezetésével és minimális kiegészítéssel a triplet modifikációk (pl. Petzvál, Tessar, Heliar, stb. típusok) esetében is alkalmazható. A tárgytávolság szempontjából történő általánosításra is reális lehetőséget látunk, mert meggyőződésünk, hogy az eddigiekben feltételezett távoli tárgy ( $s_1 = \infty$ ) esetétől eltérően, tetszőleges, véges tárgytávolságból kiindulva is létezik és meghatározható egy, az összes lehetséges triplet teljesítménydetermináló paramétereit generáló, a jelenlegihez (14) hasonló, bár attól bonyolultabb szerkezetű alapegyszerlet. Végül, abból kiindulva, hogy bármely optikai rendszer visszavezethető három alapvető csoportból álló „triplet”-re, következik, hogy az ismertetett új módszer a legteljesebb általánosításra alkalmas.

10.2. Az új módszer grafikus és algebrai formában megadott új, (a klasszikus tervezésnél is előnyösen felhasználható) számítógépre kiválóan programozható algoritmusokon ((14), (29), (30), 2. ábra) alapul (2.2).

10.3. Az új módszer az alapvető specifikációs adatok (relatív nyílás, tárgyszög), valamint a teljesítménydetermináló paraméterek (képtávolság, szerkezeti hossz, fókusz távolságok és légközők) közötti összefüggések (2. ábra, (14)) feltárásával biztosítja az optimális kiindulási adatok (2.3.) meghatározását. Ily módon az automatikus (vagy hagyományos) tervezés eredményeképpen kapott triplet képalkotási hibáinak maradék értékei a kiindulás miatt predestinált módon a lehetséges minimumok (2.4.) legkedvezőbbjei közül valók.

10.4. Az új módszer kialakításakor az optikai tervezés és a geometriai optika alapvető összefüggéseiből, mint olyanból (2.5.) indultunk ki. Az új módszer további lényeges jellemzője, hogy — az eddigiektől gyökeresen eltérő módon — célkitűzéseiben és algoritmusában a tervezés kezdetén, a teljesítménydetermináló kiindulás körülhatárolása folyamán a legkorrektebb és legpontosabb; a továbbiakban alkalmazott közelítések rendje a feladat megoldásának előrehaladtával egyre csökken (harmadrend: üvegválasztás, a vékony rendszer hajlítása; elsőrend: lineáris finomkorrekció).

10.5. Az új módszer további előnye az, hogy az összes lehetséges kiindulási változat rendszeres vizsgálatát lehetővé teszi. Az ebből fakadó biztonságot tovább fokozza annak az objektív lehetőségnek a kihasználása, hogy automatikus tervezés esetén a viszonylag csekély számú, megjegyzést igénylő adat miatt kis memóriakapacitású számítógép alkalmazásakor is akár tíz változat futtatható lépésenként párhuzamosan, egyidejűleg.



Az optikai tervezés módszere és eszköze a számítógépek megjelenése óta nem alkot egyenszilárd rendszert. A számítógépek alkalmazásával a numerikus számítások elvégzésének gyorsasága nagyságrendekkel emelkedett, az optikai rendszerek tervezésének időtartama legfeljebb néhányad részére csökkent [7]. Ezt az egyre markánsabban jelentkező ellentmondást feloldani, valamint az optikai rendszerek automatikus tervezésének jobb megoldásai felé haladni csak új, termelékeny, sokoldalú általánosíthatóságra alkalmas algoritmusok megalkotásával lehet.

#### Köszönetnyilvánítás

Szerző köszönettel tartozik LACK Gábornak az elegáns algebrai levezetésekért és a problémák megoldásának matematikai biztosításában tanúsított önzetlen közreműködéséért.

#### IRODALOM

1. TAYLOR, H. D.: Lens. United States Patent Office, No. 568,052 (1896), 1—11
2. LITTEN, W. et. al.: Photographic Objectives of the Cooke Triplet Type. United States Patent Office, No. 2,503,751 (1950), 1—8
3. KALLÓ, P.: Critical Summary of the Design Methods of Form-Independent Thin Triplet Systems. *Acta Techn. Hung.* 73 (1974), 133—142
4. VOLKMAN, H.: Neue Dimensionen der photographischen Technologie. *Umschau* 72 (1972), 449—455
5. KALLÓ, P.: Some Fundamental Relations in the Design of Optical Systems. *Optica Applicata* 4 (1974), 3—7
6. KALLÓ, P.: The Present Situation of Optical Design Automation. *Kép- és Hangtechn.* 20 (1974), 69—70
7. SLIUSAREV, G. G.: Metody rascheta opticheskikh sistem. 2. izd. Izdatel'stvo „Mashinostroenie”, Leningrad, 1969
8. VOLOSOV, D. S.: Fotograficheskaja optika. 1. izd. Izdatel'stvo „Iskusstvo”, Moszkva 1971
9. EMSLEY, H. H.: Aberration of Thin Lenses. 1. Ed. Constable and Company LTD. London 1956
10. JAMIESON, T. H.: Optimization Techniques in Lens Design. 1. Ed. Adam Hilger, London 1978
11. FIALOVSKY L.: Differenciál módszer és kiegyenlítő számítás alkalmazása az optikai rendszerek finomkorrigálásához. *MTA Műsz. Tud. Oszt. Közl.* 34 (1964), 410—434
12. KALLÓ, P.: Triplet Type Objective Lens. Hungarian Patent Office, No. 3260 (1974), 1—5

**Algorithm for Automatic Triplet Design.** After summing up the experiences collected through the application of the automatic design methods of optical systems known so far, an algorithm entirely new in its starting point and initial stages, suitable for the optimized automatic (and traditional) design of classical triplet type objectives is described. The paper explains in detail the definition of the notion of performance determinant parameters, the derivation of the basic triplet equations, and the relations of glass material selection; the well-known methods of bending and fine correction are covered only as much as needed. The important advantage of the new algorithm easy to program for a computer and providing for a number of optimization possibilities is that it requires as a starting point for automatic (and traditional) triplet design nothing but the knowledge of the relative aperture and field angle given in advance, and the data of the adaptable glass types, and that it is suitable for multilateral generalization (other optical system types containing cemented lenses as well, finite object distance, etc.).

**Ein Algorithmus für den automatischen Entwurf von Triplets.** Zusammenfassend werden die bei der Anwendung der bisher bekannten automatischen Berechnungsverfahren für optische Systeme gemachten Erfahrungen ausgewertet. Für den optimierten, automatischen (und traditionellen) Entwurf der klassischen Tripletobjektive wird ein, in seinem Ausgangspunkt und dem Anfangsabschnitt vollkommen neuer Algorithmus vorgestellt. Die Arbeit behandelt eingehend die Definition der leistungsbestimmenden Parameter, die Ableitung der Grundgleichungen für Triplets und die Zusammenhänge bei der Auswahl des Glaswerkstoffes; auf die bekannten Methoden der Durchbiegung und der Feinkorrektur wird nur im allernotwendigsten Ausmaß eingegangen. Die Bedeutung des neuen, gut programmierbaren und zahlreiche Optimierungsmöglichkeiten bietenden Algorithmus besteht darin, daß zur automatischen (und traditionellen) Berechnung der Triplets als Ausgang nur die vorausgegebene relative Öffnung, der Objektwinkel sowie die Angaben der verwendeten Gläser benötigt werden und daß er in mehreren Richtungen verallgemeinert werden kann (andere Typen von — auch gekittete Linsen enthaltenden — optischen Systemen, endliche Objektweite, usw.).